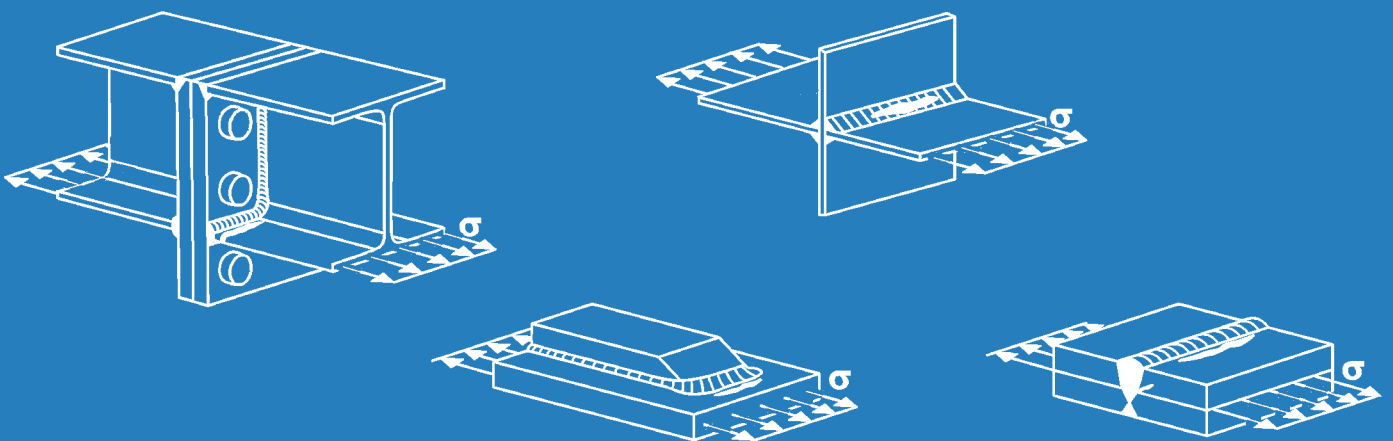


4/2019

Forschungsbericht

Neubewertung und Erweiterung
des Kerbfallkatalogs nach
Eurocode 3 für eine
zukunftsfähige Auslegung
hochbeanspruchter
Stahlkonstruktionen



Stahlbau Verlags- und Service GmbH

Copyright-Klausel mit Haftungsbegrenzung

© Copyright - Klausel

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Verwertungsrechte liegen beim Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. DASt (Sohnstr. 65, D-40237 Düsseldorf). Dies gilt auch für die fotomechanische Wiedergabe und die Speicherung auf elektronischen Medien. Bei gewerblichen Zwecken dienender Vervielfältigung ist an den DASt gemäß § 54 UrhG eine Vergütung zu zahlen, deren Höhe im Einzelfall zu vereinbaren ist. Die dadurch begründeten Rechte, besonders die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Bildentnahme, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Nachspeicherung und Auswertung von Datenverarbeitungsunterlagen, bleiben auch bei Verwendung von Teilen des Werkes dem DASt vorbehalten.

Bei der Zusammenstellung aller Texte und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Autoren, der Verlag und der Herausgeber können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen keine Haftung übernehmen; dies gilt nicht für Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit. Rechtsansprüche aus der Benutzung der vermittelten Daten sind insoweit ausgeschlossen.

Für alle Hinweise und Verbesserungsvorschläge ist der Herausgeber stets dankbar.

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt,
Düsseldorf

Vertrieb:
Stahlbau Verlags- und Service GmbH,
Düsseldorf

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

4/2019

Forschungsbericht

**Neubewertung und
Erweiterung des
Kerbfallkatalogs nach
Eurocode 3 für eine
zukunftsfähige Auslegung
hochbeanspruchter
Stahlkonstruktionen**

**RWTH Aachen University
Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau
Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann**

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer**

**Universität Stuttgart
Institut für Konstruktion und Entwurf
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann**

Stahlbau Verlags- und Service GmbH

Forschungsvereinigung	Deutscher Ausschuß für Stahlbau e.V. DAST in Kooperation mit Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. FOSTA
Forschungsstellen	RWTH Aachen University Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine Universität Stuttgart Institut für Konstruktion und Entwurf
IGF-Nummer	19178N
DAST-Homepage	dast.deutscherstahlbau.de

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „Neubewertung und Erweiterung des Kerbfallkatalogs nach Eurocode 3 für eine zukunftsfähige Auslegung hochbeanspruchter Stahlkonstruktionen“, IGF-Projekt Nr. 19178 N, der Forschungsvereinigung Deutscher Ausschuss für Stahlbau in Kooperation mit Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. FOSTA, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

**Neubewertung und Erweiterung des
Kerbfalkatalogs
nach Eurocode 3 für eine
zukunftsfähige Auslegung
hochbeanspruchter
Stahlkonstruktionen**

IGF-Vorhaben Nr.: 19178 N

**Im Auftrag von
Deutscher Ausschuß für Stahlbau
in Kooperation mit
Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.
FOSTA**

**Sohnstraße 65
40237 Düsseldorf**

Aachen, 19. Dezember 2019



**Institut für Stahlbau und Lehrstuhl für
Stahlbau und Leichtmetallbau**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann
Helen Bartsch, M. Sc.**

Mies-van-der-Rohe-Str. 1
D-52074 Aachen



**Versuchsanstalt für Stahl, Holz und
Steine**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas
Ummenhofer
Benjamin Seyfried, M. Sc.**

Otto-Amman-Platz 7
D-76131 Karlsruhe



Institut für Konstruktion und Entwurf

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann
Karl Drebenstedt, M. Sc.**

Pfaffenwaldring 7
D-70569 Stuttgart

Kurzzusammenfassung

In vielen Bereichen unserer Infrastruktur, wie z. B. im Brückenbau, im Kran- bzw. Kranbahnbau und auch im Hochbau oder Schornstein- und Mastbau unterliegen Stahlkonstruktionen zyklischen Beanspruchungen, die den Nachweis gegen Ermüdung erfordern. Eine große Bedeutung kommt bei der Auslegung solcher hochbeanspruchter Konstruktionen im Bauwesen dem Kerbfallkatalog in DIN EN 1993-1-9 [1] zu, der die Ermüdungsfestigkeit spezifischer Konstruktionsdetails regelt. Eigentlich sollen Normen zu sicheren Nachweisen führen, dabei jedoch nicht überkonservativ sein, um im Sinne der Ressourcenschonung auch eine wirtschaftliche Dimensionierung zu ermöglichen. Tatsächlich kann man zeigen, dass im Vergleich zu früheren deutschen Normen oder Regelwerken anderer Bereiche der Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 [1] in vielen Fällen zu konservativeren d.h. wirtschaftlich ungünstigeren Ergebnissen führt. Die Basis des Kerbfallkatalogs stammt aus 1989 und älter, neuere Erkenntnisse sind bisher nicht eingegangen. Die Versuchsdaten wurden seinerzeit nach Verfahren zusammengestellt und ausgewertet, die nicht mehr dem heutigen Stand der Technik entsprechen.

Aus diesem Grund zielte das hier präsentierte Forschungsvorhaben auf die Erarbeitung von Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Kerbfallkataloges in DIN EN 1993-1-9 [1] bezogen auf Konstruktionsdetails des Stahl- und Verbundbrückenbaus, Kran- und Kranbahnbaus sowie des Mast- und Schornsteinbaus ab. Dabei wurde die Versuchsgrundlage des vorhandenen Kerbfallkatalogs nach DIN EN 1993-1-9 [1] in für die Praxis wesentlichen Bereichen kritisch hinterfragt und mit modernen statistischen Verfahren Neubewertet sowie um aktuelle Forschungsergebnisse und -versuche erweitert. Hierzu wurden statistische Auswertemethoden evaluiert und eine moderne Datenbankstruktur entwickelt. Ferner wurde der Kerbfallkatalog um fehlende bzw. nicht hinreichend klassifizierte Details ergänzt: Dies betrifft neue Details des Gurtlamellenendes und des Stirnplattenstoßes mit vorgespannten Schrauben. Als wichtigstes Ergebnis des Projektes werden verbesserte Kerbfalltabellen für eine wirtschaftlichere, differenzierte und sicherere Ermüdungsbemessung vorgeschlagen.

Abstract

In many areas of our infrastructure, e.g. bridge construction, crane and crane runway construction and also in buildings or chimney and mast construction, steel structures are subject to cyclic stresses, which require verification against fatigue. The detail catalogue in DIN EN 1993-1-9 [1], which regulates the fatigue strength of specific details, is of great importance for the design of such highly stressed structures in the construction industry. Standards should actually lead to reliable verifications, but should not be over-conservative in order to enable economic dimensioning in the sense of resource conservation. In fact, it can be shown that in comparison to earlier German standards or rules in other areas, the detail catalogue according to DIN EN 1993-1-9 [1] in many cases leads to more conservative i.e. economically unfavourable results. The basis of the detail catalogue dates back to 1989 and older, more recent findings have not yet been incorporated. At that time, the test data were collected and evaluated according to procedures which no longer correspond to the current state of the art.

For this reason, the research project presented here was aimed at the preparation of recommendations for the further development of the detail catalogue in DIN EN 1993-1-9 [1] in relation to details of steel and composite bridge construction, crane and crane runway construction as well as mast and chimney construction. In the process, the test basis of the existing detail catalogue according to DIN EN 1993-1-9 [1] was critically questioned in areas essential for practice and re-evaluated using modern statistical methods and expanded to include current research results and tests. For this purpose, statistical evaluation methods were assessed and a modern database structure was developed. Furthermore, the addition of missing or insufficiently classified details to the detail catalogue was dealt with: This concerns new details of the transverse end weld of cover plates and the headed plate butt splice with prestressed bolts. As the most important result of the project, improved detail tables have been proposed for a more economical, differentiated and safer fatigue design.

Vorwort

Das hier beschriebene Forschungsvorhaben wurde gemeinsam von 3 Forschungsstellen bearbeitet. Dabei teilte sich die Arbeit wie folgt auf:

Die Sammlung und Aufarbeitung der experimentellen Daten zu Tabelle 8.1: „Ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln“, Tabelle 8.2: „Geschweißte zusammengesetzte Querschnitte“, Tabelle 8.7: „Geschweißte Knoten von Fachwerkträgern“, Tabelle 8.8: „Orthotrope Platten mit Hohlrippen“ wurde von Fr. Bartsch (Institut für Stahlbau, Leiter: Hr. Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann, RWTH Aachen) durchgeführt. Untersuchungen zu Neubewertungen der Tabelle 8.9: „Orthotrope Platten mit offenen Rippen“ und Tabelle 8.10: „Obergurt-Stegblech Anschlüsse von Kranbahnträgern“ wurden ebenfalls von Fr. Bartsch umgesetzt. Ferner wurden experimentelle und numerische Untersuchungen zum Stirnplattenstoß mit vorgespannten Schrauben von Fr. Bartsch durchgeführt.

Hr. Seyfried (Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Leiter: Hr. Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer, KIT Karlsruhe) führte die Sammlung, Aufarbeitung und Neuauswertung der experimentellen Daten zu Tabelle 8.5: „Geschweißte Stöße“ sowie zur Tabelle 8.6: „Hohlprofile“ durch.

Die Bearbeitung des Kapitels 3 zur statistischen Bewertung von Ermüdungsversuchen erfolgte durch Hr. Drebenstedt (Institut für Konstruktion und Entwurf, Leiterin: Fr. Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Universität Stuttgart). Die Sammlung und Aufarbeitung der experimentellen Daten zu Stumpfnähten (Kapitel 6.3), sowie den geschweißte Anschlüsse und Steifen (Kapitel 6.4) wurde ebenfalls von Hr. Drebenstedt vorgenommen.

Die experimentellen Untersuchungen am Konstruktionsdetail Gurtlamellenende sowie deren Auswertungen in Kapitel 7 wurden ebenfalls von Hr. Drebenstedt durchgeführt.

Die Inhalte der von Hr. Drebenstedt bearbeiteten Teile sind auch Teil seiner derzeit in Arbeit befindlichen Dissertation [2].

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Motivation	2
1.3	Zielsetzung	2
1.4	Methodische Vorgehensweise	3
2	Stand der Technik	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Grundlagen der Ermüdung	4
2.3	Stand der Normung beim Ermüdungsnachweis	7
2.3.1	Übersicht	7
2.3.2	Hintergrund und Nachweisführung der DIN EN 1993-1-9	7
2.3.3	Vergleich verschiedener Nachweiskonzepte	14
2.3.4	Lokale Konzepte	24
2.4	Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit	32
2.4.1	Mittelspannungseinfluss	32
2.4.2	Bauteileinfluss und Größeneffekt	36
2.4.3	Einfluss der Materialfestigkeit	37
3	Statistische Bewertung von Ermüdungsversuchen	38
3.1	Widerstandmodel	38
3.2	Lineare Regression	39
3.3	Verteilungsfunktion	40
3.4	Ermittlung charakteristischer Wöhlerlinien	41
3.5	Rechenbeispiel	43
3.6	Bewertung signifikanter Einflussgrößen	45
4	Datenbank für Ermüdungsversuche	47
4.1	Struktur	47
4.1.1	Einführung	47
4.1.2	Hierarchie der Datenbankstruktur	47
4.1.3	Integrierte Informationen	48
4.2	Verwaltungssystem MySQL	51
4.3	Datenbankanwendung über Website	52
4.3.1	Allgemeines	52
4.3.2	Darstellung der Daten	54
4.3.3	Suche nach Daten	54

4.3.4	Auswertung von Daten	55
4.3.5	Eintragung von Daten	55
5	Analyse der Versuchsdatensammlung	57
5.1	Literaturrecherche und Quellenqualität	57
5.2	Selektion der Versuchsserien	58
6	Auswertung der gesammelten experimentellen Daten	60
6.1	Ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln – Tabelle 8.1	60
6.1.1	Übersicht	60
6.1.2	Gewalzte Erzeugnisse in Form von Walzprofilen – Detail 2	60
6.1.3	Maschinell gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung – Detail 4	63
6.1.4	Gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnittene und mechanisch bearbeitete Bleche – Detail 5	66
6.1.5	Symmetrische zweiseitige Verbindung mit vorgespannten Schrauben – Detail 8	69
6.1.6	Zweiseitige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben – Detail 9	72
6.1.7	Bauteile mit Löchern – Detail 11	74
6.1.8	Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben – Detail 13	77
6.1.9	Schrauben und Gewindestangen unter Zug – Detail 14	79
6.1.10	Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen – Detail 15	82
6.2	Geschweißte zusammengesetzte Bauteile – Tabelle 8.2	84
6.2.1	Übersicht	84
6.2.2	Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen – Detail 2	85
6.2.3	Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen – Detail 3	87
6.2.4	Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte – Detail 590	
6.2.5	Unterbrochene Längsnähte – Detail 8	92
6.2.6	Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten – Detail 9	94
6.2.7	Längsbeanspruchte Stumpfnäht – Detail 10	97
6.2.8	Automatisch geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen – Detail 11	100
6.3	Quer laufende Stumpfnähte – Tabelle 8.3	102
6.3.1	Übersicht	102
6.3.2	Kerbfrei bearbeitete Stumpfstöße	103
6.3.3	Stumpfstöße in Blechen und Flachstählen	107

6.3.4	Stumpfstöße mit Geometrieänderung.....	112
6.3.5	Vollstöße von Walzprofilen	115
6.3.6	Vollstöße von Walzprofilen mit Freischnitt.....	118
6.3.7	Einseitig geschweißte Stumpfnähte.....	120
6.3.8	Einseitig geschweißte Stumpfnähte mit keramischer Schweißbadsicherung	122
6.3.9	Stumpfnähte mit verbleibender Schweißbadsicherung.....	125
6.3.10	Stumpfstöße mit Dickensprung.....	129
6.3.11	Lamellenstoß.....	132
6.4	Angeschweißte Anschlüsse und Steifen – Tabelle 8.4	133
6.4.1	Übersicht	133
6.4.2	Längssteife	134
6.4.3	Längssteife mit Anfasung	139
6.4.4	Längssteife mit Radius und kerbfrei bearbeitetem Kerbübergang	142
6.4.5	Längssteife am Bauteilrand	144
6.4.6	Längssteife am Bauteilrand mit Radius und kerbfrei bearbeitetem Schweißnahtübergang.....	148
6.4.7	Quersteife auf Blechen	153
6.4.8	Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Trägern	159
6.4.9	Geschweißte Kopfbolzendübel und Schweißbuchsen.....	164
6.5	Geschweißte Stöße – Tabelle 8.5	168
6.5.1	Kreuz- und T-Stöße	168
6.5.2	Anschlüsse mit überlappenden Bauteilen.....	176
6.5.3	Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern	184
6.5.4	Schubbeanspruchte Kehlnähte	188
6.5.5	Kopfbolzendübel in Verbundwirkung unter Schubbeanspruchung	192
6.5.6	Ringflanschanschlüsse.....	194
6.6	Hohlprofile – Tabelle 8.6.....	196
6.6.1	Rohr-Blech-Anschlüsse	196
6.6.2	Stumpfstöße von Hohlprofilen	199
6.6.3	Hohlprofil als Anbauteil – Kerbdetail 5.....	204
6.6.4	Kopfplattenstöße von Hohlprofilen.....	207
6.7	Geschweißte Knoten und Fachwerkträgern – Tabelle 8.7	210
6.7.1	Übersicht und Hintergrund.....	210
6.7.2	K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt – Detail 1.....	212
6.7.3	K- und N-Rechteckprofil-Knoten mit Spalt – Detail 2	216
6.7.4	K-Knoten mit Überlappung – Detail 3	220

6.7.5	N-Knoten mit Überlappung – Detail 4	224
6.8	Orthotrope Platten mit Hohlrippen	227
6.8.1	Übersicht	227
6.8.2	Durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger – Detail 1 ...	228
6.8.3	Durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger – Detail 2.	231
6.8.4	Längsrippen am Querträger stoßen – Detail 3	233
6.8.5	Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung – Detail 4	236
6.8.6	Von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung – Detail 5	240
6.8.7	Kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten – Detail 6	243
6.8.8	Versenkte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe – Detail 7	245
6.8.9	Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe – Detail 8	248
6.9	Orthotrope Platten mit offenen Rippen – Tabelle 8.9.....	251
6.9.1	Übersicht	251
6.9.2	Anschluss der Längsrippe and den Querträger laut ENV 1993-2.....	252
6.9.3	Anschluss der Längsrippe and den Querträger laut DIN Fachbericht 103	254
6.9.4	Fazit.....	254
6.10	Obergurt- Stegblech Anschlüsse von Kranbahnträgern – Tabelle 8.10.....	255
7	Experimentelle Untersuchungen zum Gurtlamellenende	256
7.1	Stand der Forschung und Normung	257
7.1.1	Stand der Forschung	257
7.1.2	Stand der Normung	262
7.2	Versuchskörper und Versuchsprogramm	265
7.2.1	Übersicht	265
7.2.2	Versuchsserien und Geometrie	265
7.2.3	Herstellung der Prüfkörper	267
7.3	Versuchsdurchführung und Messtechnik.....	270
7.4	Versuchsergebnisse	274
7.4.1	Übersicht	274
7.4.2	Bruchflächenanalyse	275
7.4.3	Analyse von Makroschliffen	277
7.4.4	Analyse der Dehnungsmessungen.....	278
7.4.5	Analyse des Blechdickeneinflusses.....	278
7.4.6	Fazit und statistische Auswertung der Versuche	280

7.5	Numerische Untersuchungen	282
7.5.1	Übersicht	282
7.5.2	Blechdickeneinfluss	282
7.5.3	Nahtgeometrie	283
7.5.4	Kerbschärfe und Schweißnahtdicke	283
7.5.5	Modellierung Gurtlamellenende in Trägergeometrie.....	284
7.6	Kerbfallvorschlag für DIN EN 1993-1-9	285
8	Experimentelle Untersuchungen zum Stirnplattenstoß mit vorgespannten Schrauben	287
8.1	Anlass.....	287
8.2	Der Stirnplattenstoß von Kranbahnträgern	288
8.2.1	Allgemeines.....	288
8.2.2	Tragverhalten der Stirnplattenverbindung mit vorgespannten Schrauben	288
8.2.3	Bisherige Untersuchungen zur Ermüdung von Stößen mit vorgespannten Schrauben	293
8.3	Probekörper und Versuchsvorbereitung	294
8.4	Versuchsstände	296
8.5	Messtechnik und Versuchsdurchführung.....	298
8.6	Versuchsergebnisse	301
8.7	Numerische Simulationen.....	309
8.7.1	Modellerstellung	309
8.7.2	Validierung der FE-Modelle anhand von Versuchen	311
8.7.3	Parameterstudie zu verschiedenen Einflussparametern	317
8.8	Fazit und Kerbfallempfehlungen	328
9	Bewertung wichtiger Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit	330
9.1	Allgemein.....	330
9.2	Bauteileinfluss und Größeneinfluss	330
9.2.1	Übersicht	330
9.2.2	Details der Tabelle 8.1.....	330
9.2.3	Details der Tabelle 8.2.....	331
9.2.4	Details der Tabelle 8.3.....	332
9.2.5	Details der Tabelle 8.4.....	336
9.2.6	Details der Tabelle 8.5.....	338
9.2.7	Details der Tabelle 8.6.....	340
9.2.8	Details der Tabelle 8.7.....	342
9.3	Mittelspannungseinfluss	344

9.3.1 Übersicht	344
9.3.2 Details der Tabelle 8.1.....	344
9.3.3 Details der Tabelle 8.2.....	346
9.3.4 Details der Tabelle 8.5.....	347
9.3.5 Details der Tabelle 8.7.....	349
9.4 Streckgrenzeinfluss	350
9.4.1 Übersicht	350
9.4.2 Detail der Tabelle 8.1	350
9.4.3 Details der Tabelle 8.3.....	351
9.5 Fertigungseinflüsse und weitere Effekte	353
9.5.1 Übersicht	353
9.5.2 Details der Tabelle 8.1.....	353
9.5.3 Details der Tabelle 8.5.....	357
9.5.4 Details der Tabelle 8.8.....	358
10 Empfehlungen von verbesserten Kerbfalldetails	359
10.1 Allgemeines	359
10.2 Tabelle 8.1.....	359
10.2.1 Gewalzte Erzeugnisse in Form von Walzprofilen - Detail 2	359
10.2.2 Maschinell gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung – Detail 4.....	360
10.2.3 Gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnittene und mechanisch bearbeitete Bleche – Detail 5	360
10.2.4 Symmetrische zweiseitige Verbindung mit vorgespannten Schrauben – Detail 8	361
10.2.5 Zweiseitige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben – Detail 9	361
10.2.6 Bauteile mit Löchern – Detail 11.....	362
10.2.7 Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben – Detail 13	362
10.2.8 Schrauben und Gewindestangen unter Zug – Detail 14	362
10.2.9 Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen – Detail 15	363
10.3 Tabelle 8.2.....	364
10.3.1 Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen – Detail 2	364
10.3.2 Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen – Detail 3.....	364
10.3.3 Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte – Detail 5	365

10.3.4	Von Hand oder automatisch einseitig durchgeschweißte Nähte, speziell bei Hohlkästen – Detail 6.....	365
10.3.5	Ausgebesserte automatisch oder handgeschweißte Kehlnähte oder Stumpfnähte – Detail 7	366
10.3.6	Unterbrochene Längsnähte – Detail 8	366
10.3.7	Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten – Detail 9	366
10.3.8	Längsbeanspruchte Stumpfnäht – Detail 10.....	367
10.3.9	Automatisch geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen – Detail 11	367
10.4	Tabelle 8.3: Stumpfstöße (durchgeschweißte)	368
10.4.1	Übersicht	368
10.4.2	Stumpfstöße von Blechen und Trägern	368
10.4.3	Vollstöße von Walzprofilen mit Freischnitt.....	369
10.4.4	Stumpfstöße mit Schweißbadsicherung	369
10.4.5	Stumpfstöße, einseitig ohne Schweißbadsicherung	370
10.4.6	Stumpfstöße mit Geometrieänderung in Breite oder Dicke	370
10.4.7	Stumpfstöße mit Schweißbadsicherung und Geometrieänderung	371
10.4.8	Stumpfstöße mit Dickensprung.....	371
10.4.9	Lamellenstoß.....	372
10.5	Tabelle 8.4 – Angeschweißte Anschlüsse und Steifen	372
10.5.1	Übersicht	372
10.5.2	Längssteife	372
10.5.3	Längssteife mit Radius und kerbfrei bearbeitetem Kerbübergang	373
10.5.4	Längssteife am Bauteilrand	374
10.5.5	Längssteife am Bauteilrand mit Radius und kerbfrei bearbeitetem Schweißnahtübergang.....	374
10.5.6	Quersteife	375
10.5.7	Kopfbolzen und Schweißbuchsen	376
10.6	Tabelle 8.5 – Geschweißte Stöße	376
10.6.1	Kreuz und T-Stöße (Schweißnaht-Übergangsversagen) – Detail 1.....	376
10.6.2	Kreuz und T-Stöße (Schweißnaht-Wurzelversagen) – Detail 3	377
10.6.3	Laschenverbindung (Deckblechversagen) – Detail 5	378
10.6.4	Gurtlamelle auf Träger („Normalausführung“ am Lamellenende) – Detail 6	378
10.6.5	Schubbeanspruchte Kehlnähte – Detail 8	379
10.6.6	Kopfbolzendübel in Verbundwirkung unter Schubbeanspruchung – Detail 10	380
10.6.7	Verstärkte Gurtlamellenenden	380

10.6.8	Stirnplattenverbindungen mit vorgespannten Schrauben	380
10.7	Tabelle 8.6 – Hohlprofile	381
10.7.1	Rohr-Blech-Anschluss mit zusammengedrücktem Endquerschnitt – Detail 1	381
10.7.2	Stumpfstöße zwischen Kreishohlprofilen – Detail 3	382
10.7.3	Stumpfstöße zwischen Kreishohlprofilen – Detail 4	382
10.7.4	Hohlprofil als Anbauteil – Detail 5	383
10.7.5	Kopfplattenstöße an Hohlprofilen mit Kehlnähten – Detail 9	383
10.8	Tabelle 8.7	384
10.8.1	K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt – Detail 1	384
10.8.2	K- und N-Rechteckprofil-Knoten mit Spalt – Detail 2	385
10.8.3	K-Knoten mit Überlappung – Detail 3	386
10.8.4	N-Knoten mit Überlappung – Detail 4	387
10.9	Tabelle 8.8	388
10.9.1	Durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger – Detail 1	388
10.9.2	Durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger – Detail 2.	389
10.9.3	Längsrippen am Querträger stoßen – Detail 3	389
10.9.4	Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung – Detail 4	390
10.9.5	Von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung – Detail 5	391
10.9.6	Kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten – Detail 6	391
10.9.7	Versenkte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe – Detail 7	392
10.9.8	Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe – Detail 8	392
10.10.	Tabelle 8.9	393
10.10.1 Anschluss der Längsrippe and den Querträger – Detail 1 und neues Detail 3	393
10.11.	Tabelle 8.10	394
11	Diskussion der Projektergebnisse	395
12	Analyse und Bewertung	396
13	Zusammenfassung	397
14	Ausblick	398
15	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen	399
16	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	401
17	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	403

18	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse.....	404
19	Literaturverzeichnis	405
20	Quellenverzeichnis.....	416
21	Danksagung.....	443
22	Anhang A – Verbesserte Kerbfalltabellen	444
23	Anhang B – Leitfaden zur Evaluierung von Ermüdungsversuchen	462
	23.1 Allgemeines	462
	23.2 Ermüdungsversuchsplanung -durchführung.....	462
	23.3 Dokumentation von Ermüdungsversuchen	463
	23.4 Erfassung von Ermüdungsversuchsdaten anhand Literatur	464
	23.5 Auswertung von Versuchsdaten	464
24	Anhang C – Datenbank Anwendung	466
25	Anhang D – Versuche an Stirnplattenverbindungen	476
26	Anhang E – FE Modell Gurtlamellenende	488
	26.1 Modellbildung	488
	26.2 Kerbmodellierung	489
	26.3 Validierung.....	490
27	Anhang F – FE Modell zur Stumpfnahht	493
28	Anhang G – FE Modell zur Längssteife.....	501

Abbildungsverzeichnis

List of figures

BILD 2-1: ZYKLISCHER BEANSPRUCHUNGSVERLAUF	5
BILD 2-2: ERMÜDUNGSFESTIGKEITSKURVE.....	6
BILD 2-3: ERMÜDUNGSFESTIGKEITSKURVEN FÜR LÄNGSSPANNUNGSSCHWINGBREITEN NACH DIN EN 1993-1-9	10
BILD 2-4: ERMÜDUNGSFESTIGKEITSKURVEN FÜR SCHUBSPANNUNGSSCHWINGBREITEN NACH DIN EN 1993-1-9	11
BILD 2-5: ALTERNATIVE ERMÜDUNGSFESTIGKEIT $\Delta\sigma C$ FÜR KERBFÄLLE, DIE MIT $\Delta\sigma C$ * BEZEICHNET SIND NACH DIN EN 1993-1-9	12
BILD 2-6: ERMÜDUNGSFESTIGKEITSKURVEN FÜR LÄNGSSPANNUNGSSCHWINGBREITEN NACH IIW-EMPFEHLUNGEN [16].....	16
BILD 2-7: BERECHNUNGSABLAUF DES ERMÜDUNGSNACHWEISES NACH FKM RICHTLINIE [17] .	19
BILD 2-8: ERMÜDUNGSFESTIGKEITSKURVEN FÜR LÄNGSSPANNUNGSSCHWINGBREITEN NACH FKM-RICHTLINIE [17]	20
BILD 2-9: ERMÜDUNGSFESTIGKEITSKURVEN FÜR LÄNGSSPANNUNGSSCHWINGBREITEN NACH EN13001-3-1	22
BILD 2-10: GRAFISCHE DARSTELLUNG UNTERSCHIEDLICHER SPANNUNGSKONZEPTE	25
BILD 2-11: GEEIGNETE DETAILS ZUR ANWENDUNG DES STRUKTURSPANNUNGSKONZEPTE [16]	26
BILD 2-12: HOT-SPOT-ARTEN NACH IIW-EMPFEHLUNGEN [16].....	27
BILD 2-13: HOT-SPOT-ARTEN NACH IIW-EMPFEHLUNGEN [16].....	27
BILD 2-14: FIKTIVE AUSTRUNDUNGEN VON SCHWEIßNAHTÜBERGÄNGEN UND -WURZELN [16]....	29
BILD 2-15: EMPFEHLUNGEN FÜR REFERENZRADIEN VON NAHTÜBERGANGS- UND NAHTWURZELKERBEN [28].....	30
BILD 2-16: TYPISCHES NETZ MIT ELEMENTEN MIT QUADRATISCHER ANSATZFUNKTION AM SCHWEIßNAHTÜBERGANG (LINKS) UND AN DER SCHWEIßWURZEL (RECHTS) [23]	31
BILD 2-17: UNTERSCHIEDLICHE BEANSPRUCHUNGSBEREICH IM DAUERSCHWINGVERSUCH	32
BILD 2-18: HAIGH-DIAGRAMM [31]	33
BILD 2-19: DAUER- UND ZEITFESTIGKEITS-SCHAUBILD FÜR KERBSTÄBE AUS DER ALUMINIUM- LEGIERUNG 3.4364.7 [30].....	34
BILD 3-1: DARSTELLUNG VON ERMÜDUNGSDATEN EINER SERIE IN ABHÄNGIGKEIT DER SPANNUNGSSCHWINGBREITE	39
BILD 3-2: VERSUCHE AM KONSTRUKTIONSDetail LÄNGSSTEIFE (A) UND VERTEILUNG DER ERGEBNISSE BEZOGEN AUF LOG A (B).....	41
BILD 3-3: SCHEMATISCHES VORGEHEN ZUR STATISTISCHEN AUSWERTUNG EINER DATENMENGE FÜR DIE BESTIMMUNG DER ERMÜDUNGSFESTIGKEIT	43

BILD 3-4: NORMIERTE STREUBÄNDER IN ABHÄNGIGKEIT DER STRECKGRENZE FÜR DAS KONSTRUKTIONSDetail LÄNGSSTEIFE (VERSUCHSDATEN BEZOGEN AUF 2 MILLIONEN SCHWINGSPIELE).....	46
BILD 4-1: HIERARCHIE DER DATENBANKSTRUKTUR.....	48
BILD 4-2: DATENBANKANWENDUNG HAUPTSEITE.....	53
BILD 5-1: ENTSTEHUNGSZEIT DER DATENSAMMLUNG – QUALITATIVE VERTEILUNG.....	58
BILD 6-1: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „WALZPROFIL“ #012 #028 #029.....	61
BILD 6-2: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSE AM AUSRUNDUNGSRADIUS UND AM FLANSCHENDE (V.L.N.R.) #028.....	62
BILD 6-3: KERBFALLABLEITUNG „WALZPROFIL“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #028 #029).....	63
BILD 6-4: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „MASCHINELL BRENNGESCHNITTENE BLECHE MIT NACHTRÄGLICHER MECHANISCHER BEARBEITUNG“ #001 #005 #250 #251 #252.....	64
BILD 6-5: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSE AN DER SEITENFLÄCHE MIT WALZHAUT #250.....	65
BILD 6-6: KERBFALLABLEITUNG „MASCHINELL BRENNGESCHNITTENER BLECHE MIT NACHTRÄGLICHER MECHANISCHER BEARBEITUNG“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #001 #005 #250 #251 #252).....	66
BILD 6-7: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „BRENNGESCHNITTENE BLECHE MIT BRENNRIEFEN ODER VON HAND GESCHNITTEN UND NACHTRÄGLICH BEARBEITET“ #001 #002 #003 #004 #005 #006 #250 #251 #252 #253.....	67
BILD 6-8: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSE AN DER BRENNGESCHNITTENEN KANTE #3, #250, #251 (V.L.N.R.).....	68
BILD 6-9: KERBFALLABLEITUNG „BRENNGESCHNITTENER BLECHE MIT BRENNRIEFEN ODER VON HAND GESCHNITTEN UND NACHTRÄGLICH BEARBEITET“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #001 #003 #004 #006 #250 #251 #253).....	68
BILD 6-10: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „SYMMETRISCHE ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT VORGESPANNTEN SCHRAUBEN“ #280 #008 #009 #1006.....	70
BILD 6-11: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSE AM BOHRLOCH #008, #1006 (V.L.N.R.).....	70
BILD 6-12: KERBFALLABLEITUNG „SYMMETRISCHE ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT VORGESPANNTEN SCHRAUBEN“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #280, #008, #1006).....	71
BILD 6-13: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT PASS- ODER NICHT VORGESPANNTEN INJEKTIONSSCHRAUBEN“ #007 #011 #013 #010.....	73
BILD 6-14: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSE AM BOHRLOCH #011.....	73

BILD 6-15: KERBFALLABLEITUNG „ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT PASS- ODER NICHT VORGESPANNTEN INJEKTIONSSCHRAUBEN“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN ID: #011).....	74
BILD 6-16: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „BAUTEILE MIT LÖCHERN“ #007 #280 #012 #1001	75
BILD 6-17: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSE AM BOHRLOCH #1001	76
BILD 6-18: KERBFALLABLEITUNG „BAUTEILE MIT LÖCHERN“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #007, #280).....	77
BILD 6-19: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „EINSCHNITTIGE ODER SYMMETRISCHE ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT LOCHSPIEL UND NICHT VORGESPANNTEN SCHRAUBEN“ #007	78
BILD 6-20: KERBFALLABLEITUNG „EINSCHNITTIGE ODER SYMMETRISCHE ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT LOCHSPIEL UND NICHT VORGESPANNTEN SCHRAUBEN“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN ID: #007)	79
BILD 6-21: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „SCHRAUBEN UND GEWINDESTANGEN UNTER ZUG“ #008 #013 #014 #015 #016 #017 #374 #375 #376 #377 #378 #379 #380 #381 #382 #383.....	80
BILD 6-22: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSEN IM GEWINDE #008 #017 #374 (v.l.n.r)..	81
BILD 6-23: KERBFALLABLEITUNG „SCHRAUBEN UND GEWINDESTANGEN UNTER ZUG“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #008 #013 #014 #015 #016 #017 #374 #375 #376 #379 #380 #381 #382 #383).....	82
BILD 6-24: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „SCHRAUBEN IN SCHER-LOCHLEIBUNGSVERBINDUNGEN“ #013 #384	83
BILD 6-25: SCHRAUBE MIT ERMÜDUNGSRISSE #013.....	83
BILD 6-26: KERBFALLABLEITUNG „SCHRAUBEN IN SCHER-LOCHLEIBUNGSVERBINDUNGEN“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN ID: #384).....	84
BILD 6-27: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE KEHLNÄHTE OHNE ANSATZSTELLEN“ #025 #028 #029 #030 #031 #032.....	86
BILD 6-28: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSEN AN DER LÄNGSNAHT (v.l.n.r.) #028 #032	86
BILD 6-29: KERBFALLABLEITUNG „MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE KEHLNÄHTE OHNE ANSATZSTELLEN“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #028 #029)	87
BILD 6-30: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE DOPPELKEHLNÄHTE ODER BEIDSEITIG DURCHGESCHWEIßTE NÄHTE MIT ANSATZSTELLEN“ #018 #019 #020 #021 #022 #024 #025 #026 #027 #039 #040 #085 #282	88
BILD 6-31: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSEN AN DER LÄNGSNAHT (v.l.o.n.r.u.) #026 #040 #039	89

BILD 6-32: KERBFALLABLEITUNG „MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE DOPPELKEHLNÄHTE ODER BEIDSEITIG DURCHGESCHWEIßTE NÄHTE MIT ANSATZSTELLEN“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #019 #020 # 021 #022 #040 #085)	90
BILD 6-33: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „HANDGESCHWEIßTE KEHLNÄHTE ODER HV-NÄHTE ODER DHV-NÄHTE“ #018 #022 #025 #037 #038 #039 #282 #285	91
BILD 6-34: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSEN AN DER LÄNGSNAHT (V.L.N.R.) #025 #039	91
BILD 6-35: KERBFALLABLEITUNG „HANDGESCHWEIßTE KEHLNÄHTE ODER HV-NÄHTE ODER DHV-NÄHTE“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #022 #025 #037 #039 #285).....	92
BILD 6-36: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „UNTERBROCHENE LÄNGSNAHTE“ #018 #35 #284	93
BILD 6-37: KERBFALLABLEITUNG „UNTERBROCHENE LÄNGSNAHTE“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN ID: #035)	94
BILD 6-38: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „LÄNGSNAHTE, KEHLNÄHTE ODER UNTERBROCHENE NÄHTE MIT FREISCHNITTEN“ #018 #012 #285	95
BILD 6-39: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSEN AM FREISCHNITT #285.....	96
BILD 6-40: KERBFALLABLEITUNG „LÄNGSNAHTE, KEHLNÄHTE ODER UNTERBROCHENE NÄHTE MIT FREISCHNITTEN“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN ID: #285)	97
BILD 6-41: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „LÄNGSBEANSPRUCHE STUMPFNAHT“ A) #012	98
BILD 6-42: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „LÄNGSBEANSPRUCHE STUMPFNAHT“ B) #012	99
BILD 6-43: KERBFALLABLEITUNG „LÄNGSBEANSPRUCHE STUMPFNAHT“ A) (QUELLEN ID: #012)	99
BILD 6-44: KERBFALLABLEITUNG „LÄNGSBEANSPRUCHE STUMPFNAHT“ B) (QUELLEN ID: #012)	100
BILD 6-45: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE LÄNGSNAHT IN HOHLPROFILIEN“ #041	101
BILD 6-46: KERBFALLABLEITUNG „MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE LÄNGSNAHT“ (QUELLEN ID: #041)	102
BILD 6-47: GESAMMELTE DATEN DES DETAILS 80301: QUELLEN IDs: #21, #63, #179, #183, #215, #223, #224, #226, #232, #233, #235, #264, #265, #266, #267, #271, #277, #312	104
BILD 6-48: BRUCHSTELLE AM „KERBFREI BEARBEITETEN STUMPFSTOß“ [66] FIGURE 6-48: FATIGUE CRACK “TRANSVERSE SPLICE GROUND FLUSH” [66]	105

BILD 6-49: KERBFALLABLEITUNG DES DETAILS „KERBFREI BEARBEITETER STUMPFSTOß“	105
BILD 6-50: NEIGUNGEN DER WÖHLERLINIE FÜR DAS DETAIL „KERBFREI BEARBEITETER STUMPFSTOß“	106
BILD 6-51: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES DETAILS „KERBFREI BEARBEITETER STUMPFSTOß“ MIT DER DIN EN 1993-1-9 [1] UND DEN IIW-EMPFEHLUNGEN [16]	107
BILD 6-52: GESAMTE DATEN DES DETAILS „STUMPFSTÖBE IN BLECHEN UND FLACHSTÄHLEN“- (QUELLEN IDS: #18, #21, #61, #63, #99, #116, #128, #149, #177, #178, #180, #181, #183, #186, #195, #216, #217, #218, #219, #220, #221, #222, #223, #224, #225, #226, #227, #228, #229, #230, #231, #232, #235, #236, #237, #239, #241, #242, #244, #249, #263, #264, #265, #266, #269, #272, #273, #277, #303, #306, #308, #311, #312)	109
BILD 6-53: BRUCHSTELLEN AM DETAIL STUMPFSTÖBE IN BLECHEN UND FLACHSTÄHLEN (A: [46], B: [45], C: [67]).....	109
BILD 6-54: KERBFALLABLEITUNG DES DETAILS „STUMPFSTÖBE IN BLECHEN UND FLACHSTÄHLEN“	110
BILD 6-55: VERGLEICH CHARAKTERISTISCHER WÖHLERLINIEN DES DETAILS STUMPFSTÖBE IN BLECHEN UND FLACHSTÄHLEN [69] UND [68]	111
BILD 6-56: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES DETAILS „STUMPFSTÖBE IN BLECHEN UND FLACHSTÄHLEN“ MIT DER DIN EN 1993-1-9 [1] UND DEN IIW-EMPFEHLUNGEN [16]	111
BILD 6-57: GESAMTE DATEN DES DETAILS „STUMPFSTOß MIT GEOMETRIEÄNDERUNG“- (QUELLEN IDS: #269)	113
BILD 6-58: KERBFALLABLEITUNG DES DETAILS STUMPFSTOß MIT GEOMETRIEÄNDERUNG (QUELLEN ID #269).....	114
BILD 6-59: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES DETAILS „STUMPFSTOß MIT GEOMETRIEÄNDERUNG“ MIT DIN EN 1993-1-9 [1]	115
BILD 6-60: GESAMTE DATEN DES DETAILS „VOLLSTÖBE VON WALZPROFILIEN“ (QUELLEN IDS: #240)	116
BILD 6-61: KERBFALLABLEITUNG DES DETAILS VOLLSTÖBE VON WALZPROFILIEN (QUELLEN ID: #240)	117
BILD 6-62: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES DETAILS „VOLLSTÖBE VON WALZPROFILIEN“ MIT DER DIN EN 1993-1-9 [1]	117
BILD 6-63: KERBFALLABLEITUNG DES DETAILS „VOLLSTÖBE VON WALZPROFILIEN MIT FREISCHNITTEN“ (QUELLEN ID: #240).....	119
BILD 6-64: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES DETAILS „VOLLSTÖBE VON WALZPROFILIEN MIT FREISCHNITTEN“ MIT DIN EN 1993-1-9 [1].....	120
BILD 6-65: GESAMTE DATEN DES DETAILS „EINSEITIG GESCHWEIßTE STUMPFSTÖBE“- (QUELLEN IDS: #183, #238, #239, #243, #244, #245, #246, #247, #279, #305, #307, #308, #309)	121
BILD 6-66: BRUCHSTELLE IN EINSEITIG GESCHWEIßTEM STUMPFSTOß (QUELLEN ID: #308) ..	121

BILD 6-67: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES DETAILS „EINSEITIG GESCHWEIßTE STUMPFNAHT“ MIT DER DIN EN 1993-1-9 [1] UND DEN IIW-EMPFEHLUNGEN [16]	122
BILD 6-68: GESAMTE DATEN DES DETAILS „EINSEITIG GESCHWEIßTE STUMPFNÄHTE MIT KERAMISCHER SCHWEIßBADSICHERUNG“ (QUELLEN IDS: #278, #279, #304, #307, #308, #301)	123
BILD 6-69: KERBFALLABLEITUNG DES DETAILS „EINSEITIG GESCHWEIßTE STUMPFNÄHTE MIT KERAMISCHER SCHWEIßBADSICHERUNG“ (QUELLEN IDS: #278, #279, #304, #301, #307, #308)	124
BILD 6-70: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES DETAILS „EINSEITIG GESCHWEIßTE STUMPFNÄHTE MIT KERAMISCHER SCHWEIßBADSICHERUNG MIT DER DIN EN 1993-1-9 [1] UND DEN IIW-EMPFEHLUNGEN [16]	125
BILD 6-71: GESAMTE DATEN DES DETAILS „STUMPFNÄHTE MIT VERBLEIBENDER SCHWEIßBADSICHERUNG“ (QUELLEN IDS: #12, #242, #279, #301, #307, #309)	126
BILD 6-72: BRUCHSTELLE IN STUMPFSTÖßEN MIT VERBLEIBENDER SCHWEIßBADSICHERUNG: (A) VERSAGEN AUSGEHEND VON DER SCHWEIßNAHTWURZEL [40], (B) VERSAGEN AUSGEHEND VOM SCHWEIßNAHTÜBERGANG [72]	127
BILD 6-73: KERBFALLABLEITUNG DES DETAILS STUMPFNÄHTE MIT VERBLEIBENDER SCHWEIßBADSICHERUNG (QUELLEN IDS: #12, #242, #279, #301, #307)	128
BILD 6-74: VERGLEICH MITTLERER WÖHLERLINIEN DES DETAILS STUMPFNÄHTE MIT VERBLEIBENDER SCHWEIßBADSICHERUNG MIT [69]	128
BILD 6-75: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES DETAILS „STUMPFNÄHTE MIT VERBLEIBENDER SCHWEIßBADSICHERUNG“ MIT DER DIN EN 1993-1-9 [1] UND DEN IIW-EMPFEHLUNGEN [16]	129
BILD 6-76: GESAMTE DATEN DES DETAILS „STUMPFSTOß MIT DICKENSPRUNG“ (QUELLEN IDS: #301)	130
BILD 6-77: KERBFALLABLEITUNG DES DETAILS „STUMPFSTOß MIT DICKENSPRUNG“ (QUELLEN ID: #301)	131
BILD 6-78: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES DETAILS „STUMPFSTOß MIT DICKENSPRUNG“ MIT DER DIN EN 1993-1-9 [1] UND DEN IIW-EMPFEHLUNGEN [16]	131
BILD 6-79: BRUCHSTELLEN LAMELLENSTOßPRÜFKÖRPERN [73]	132
BILD 6-80: KERBFALLABLEITUNG DES DETAILS „LAMELLENSTOß“ (QUELLEN ID: #1025)	133
BILD 6-81: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDETAIL LÄNGSSTEIFE (WIE GESCHWEIßT) (QUELLEN IDS: #12, #47, #60, #62, #81, #116, #139, #140, #141, #142, #143, #144, #145, #147, #148, #149, #150, #151, #153, #155, #156, #157, #158, #159, #160, #163, #164, #260, #301, #1003, #1014, #1021)	135
BILD 6-82: VERSUCHSKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSE AN LÄNGSSTEIFE [74], [75], [76], [77], [40]	136
BILD 6-83: KERBFALLABLEITUNG RECHTECKIGE LÄNGSSTEIFE ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #47, #60, #81, #116, #139, #141, #143, #145,	

#164, #149, #150, #151, #153, #148, #158, #164, #260, #301, #1002, #1014, #1028)	137
BILD 6-84: VERGLEICH MITTLERER WÖHLERLINIEN MIT [69] UND [79]	138
BILD 6-85: VERGLEICH CHARAKTERISTISCHER WÖHLERLINIEN MIT [1] UND [16].....	139
BILD 6-86: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail LÄNGSSTEIFE MIT ANFASUNG (QUELLEN IDS: #73, #141, #301)	140
BILD 6-87: VERSUCHSKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISS AN ANGEFASSTER LÄNGSSTEIFE: ERMÜDUNGSRISS (A), PRÜFKÖRPER (B) [40].....	141
BILD 6-88: KERBFALLABLEITUNG ANGEFASSTE LÄNGSSTEIFE ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #71, #301)	141
BILD 6-89: VERGLEICH CHARAKTERISTISCHER WÖHLERLINIEN MIT [1] UND [16].....	142
BILD 6-90: LÄNGSSTEIFEN AN QUERTRÄGERN MIT ABSCHRÄGUNGEN UND ABRUNDUNGEN: SCHIERSTEINER BRÜCKE.....	143
BILD 6-91: PRÜFKÖRPER LÄNGSSTEIFE MIT RADIUS UND GESCHLIFFEN KERBÜBERGANG (A), ERMÜDUNGSRISS (B)	144
BILD 6-92: DARSTELLUNG ALLER BEKANNTEN VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail: LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND (QUELLEN IDS: #18, #96, #102, #116, #141, #162, #163, #164, #165, #167, #168, #169, #170).....	145
BILD 6-93: ERMÜDUNGSRISS AM NAHTÜBERGANG LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND: BEISPIEL FÜR PRÜFKÖRPERGEOMETRIE (A), VERSAGENSbilder (B – D) [81] [82] [83]	146
BILD 6-94: KERBFALLABLEITUNG LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #18, #102, #116, #141, #162, #163, #164, #170)	147
BILD 6-95: VERGLEICH MITTLERER WÖHLERLINIEN MIT [69].....	147
BILD 6-96: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES Details „LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND“ MIT DER DIN EN 1993-1-9 [1] UND DEN IIW-EMPFEHLUNGEN [16]...	148
BILD 6-97: HINTERGRUND ZUR KERBFALLABLEITUNG ZUM KONSTRUKTIONSDetail LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND MIT RADIUS UND KERBFREI BEARBEITET [65]	150
BILD 6-98: DARSTELLUNG ALLER BEKANNTEN VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail: „LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND MIT RADIUS UND GESCHLIFFENEM KERBÜBERGANG“ (QUELLEN IDS: #12, #102 (AUCH IN #117), #162)	151
BILD 6-99: ERMÜDUNGSRISS AM NAHTÜBERGANG LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND MIT RADIUS UND KERBFREI BEARBEITET (A) KLEINVERSUCH (B) TRÄGERVERSUCH [84].....	152
BILD 6-100: KERBFALLABLEITUNG LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND MIT RADIUS UND KERBFREI BEARBEITET ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #102, (AUCH IN #117), #162)	152
BILD 6-101: VERGLEICH DER CHARAKTERISTISCHEN WÖHLERLINIEN DES Details „LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND MIT RADIUS UND KERBFREI BEARBEITET“ MIT DER DIN EN 1993-1-9 [1] UND DEN IIW-EMPFEHLUNGEN [16]	153

BILD 6-102: DARSTELLUNG ALLER BEKANNTEN VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail: „QUERSTEIFE AUF BLECHEN“ (QUELLEN IDS: #319, #1030, #1029, #316, #313, #314, #315, #188, #187, #186, #185, #110, #184, #102, #182, #183, #181, #175, #193, #192, #191, #189, #81, #171, #47, #18, #172, #76, #61, #147, #143, #173, #176, #96, #177, #103, #100, #178, #179, #180).....	155
BILD 6-103: KERBFALLABLEITUNG „QUERSTEIFE AUF BLECH“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #319, #1030, #1029, #316, # 313, #314, #315, #188, #187, #186, #185, #110, #184, #102, #182, #175, #192, #191, #189, #81, #171, #172, #76, #147, #143, #173, #100, #178	156
BILD 6-104: KERBFALLABLEITUNG „QUERSTEIFE AUF BLECH“ MIT $L < 50$ MM, ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #319, #1030, #316, #102, #189)	156
BILD 6-105: KERBFALLABLEITUNG „QUERSTEIFE AUF BLECH“ MIT $L \geq 50$ MM, ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #316)	157
BILD 6-106: VERGLEICH MITTLERER WÖHLERLINIEN DES DETAILS „QUERSTEIFE AUF BLECHEN“ MIT [69] UND [79].....	158
BILD 6-107: VERGLEICH CHARAKTERISTISCHER WÖHLERLINIEN DES DETAILS „QUERSTEIFE AUF BLECHEN“ MIT [1] UND [16].....	159
BILD 6-108: DARSTELLUNG ALLER BEKANNTEN VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail: VERTIKALSTEIFE IN WALZ- ODER GESCHWEIßTEN TRÄGERN (QUELLEN IDS: #1007, #29, #142, #162, #143, #198, #37, # 200, #202, #38, #27, #204, #205, #207, #196)	161
BILD 6-109: ERMÜDUNGSRISSE AN EINER HALBHohen VERTIKALSTEIFE (A) 51 [85]; ERMÜDUNGSRISSE EINER VERTIKALSTEIFE MIT AUSSPARUNG IM BEREICH DER TRÄGER LÄNGSNAHT (B) 49 [83], ERMÜDUNGSRISSE EINER VERTIKALSTEIFE OHNE AUSSPARUNG (C) [86]	162
BILD 6-110: KERBFALLABLEITUNG: VERTIKALSTEIFE IN WALZ- ODER GESCHWEIßTEN TRÄGERN (QUELLEN IDS: #1007, #29, #142, #162, #143, #198, #37, #202, #38, #196)	163
BILD 6-111: VERGLEICH MITTLERER WÖHLERLINIEN DES DETAILS „VERTIKALSTEIFEN IN WALZ- ODER GESCHWEIßTEN PROFILen“ MIT [87]	163
BILD 6-112: DARSTELLUNG ALLER BEKANNTEN VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail: GESCHWEIßTER KOPFBOLZENDÜBEL (QUELLEN IDS: #318, #12, #209, #210, #211, #212, #213, #214)	165
BILD 6-113: ERMÜDUNGSRISSE AM NAHTÜBERGANG DER SCHWEIßWULST VON BOLZENGESCHWEIßTEN KOPFBOLZENDÜBELN (A) [88] UND GEWINDEBOLZEN (B) [89], ERMÜDUNGSRISSE AM NAHTÜBERGANG VON BUTZEN MIT UMLAUFENDER KEHLNAHT (C) UND (D) [90]	166
BILD 6-114: KERBFALLABLEITUNG: KOPFBOLZENDÜBEL (QUELLEN IDS: #209, #213, #214, #318).....	167
BILD 6-115: VERGLEICH CHARAKTERISTISCHER WÖHLERLINIEN DES DETAILS „KOPFBOLZENDÜBEL“ MIT [1] UND [16].....	168
BILD 6-116: KREUZSTOß-PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSE AUSGEHEND VOM SCHWEIßNAHTÜBERGANG (A) SOWIE VON DER SCHWEIßNAHTWURZEL (B) [#60].....	169

BILD 6-117: KREUZ- UND T-STÖßE MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1] .	169
BILD 6-118: DARSTELLUNG ALLER EINZELVERSUCHSDATEN ZUM KREUZSTOß – KERBDetail 1 (SCHWEIßNAHTÜBERGANGSVERSAGEN, WIE GESCHWEIßT) [QUELLEN: #57, #59, #60, #62, #63, #64, #73, #98, #99, #108, #113, #119, #126, #127, #299, #300, #390, #391, #393]	170
BILD 6-119: KERBFALLABLEITUNG KREUZSTOß MIT SCHWEIßNAHT-ÜBERGANGSVERSAGEN (KERBDetail 1) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #57, #59, #60, #62, #63, #64, #73, #113, #119, #393)	172
BILD 6-120: DURCH DIE VORHANDENEN DATEN FÜR KERBDetail 1 ERFASSTER PARAMETERBEREICH (LINKS) SOWIE ZUGEHÖRIGE ABSTUFUNG DER KERBFÄLLE NACH DIN EN 1993-1-9 [1] (RECHTS).....	173
BILD 6-121: DARSTELLUNG ALLER EINZELVERSUCHSDATEN ZUM KREUZSTOß – KERBDetail 3 (SCHWEIßNAHTWURZELVERSAGEN, WIE GESCHWEIßT) [QUELLEN IDS: #57, #58, #59, #60, #61, #62, #63, #64, #68, #81, #93, #94, #97, #98, #99, #100, #101, #102, #103, #104, #105, #106, #108, #110, #111, #112, #113, #114, #116, #117, #119, #120, #121, #123, #126, #127, #130, #299, #300, #390, #391, #392, #393, #395, #1005]	173
BILD 6-122: KERBFALLABLEITUNG KREUZSTOß MIT SCHWEIßNAHT-WURZELVERSAGEN (KERBDetail 3) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE [QUELLEN IDS: #57, #58, #59, #60, #61, #62, #63, #64, #93, #94, #97, #98, #100, #101, #102, #104, #105, #106, #110, #111, #112, #113, #117, #120, #127, #130, #390, #393, #1005]	176
BILD 6-123: ANSCHLÜSSE MIT ÜBERLAPPENDEN BAUTEILEN UND KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1]	177
BILD 6-124: DARSTELLUNG ALLER EINZELVERSUCHSDATEN ZUM KERBDetail 4 – VERSAGEN IM BEREICH DER STIRNKEHLNAHT (WIE GESCHWEIßT) [QUELLEN IDS: #12, #68, #91, #95, #113, #133]	178
BILD 6-125: ÜBERLAPPENDE LASCHENVERBINDUNG MIT ERMÜDUNGSRISSEN AUSGEHEND VOM SCHWEIßNAHTÜBERGANG (A) SOWIE VON DER SCHWEIßNAHTWURZEL (B) [#91]	178
BILD 6-126: AUSWERTUNG DER GEFILTERTEN VERSUCHSERGEBNISSE MIT SCHWEIßNAHT-ÜBERGANGSVERSAGEN AN DER STIRNKEHLNAHT (KERBDetail 4A) [QUELLEN IDS: #68, #91, #113]	179
BILD 6-127: AUSWERTUNG DER GEFILTERTEN VERSUCHSERGEBNISSE MIT SCHWEIßNAHT-WURZELVERSAGEN AN DER STIRNKEHLNAHT (KERBDetail 4B) [QUELLEN IDS: #91, #113]	180
BILD 6-128: DARSTELLUNG ALLER EINZELVERSUCHSDATEN ZUM KERBDetail 5 – VERSAGEN IM BEREICH DER SCHWEIßNAHTENDEN (WIE GESCHWEIßT) [QUELLEN IDS: #74, #78, #84, #293, #294]	182
BILD 6-129: AUSWERTUNG DER GEFILTERTEN VERSUCHSERGEBNISSE MIT VERSAGEN IM BEREICH DER SCHWEIßNAHTENDEN (KERBDetail 5) [QUELLEN IDS: #74].....	183
BILD 6-130: DARSTELLUNG ALLER EINZELVERSUCHSDATEN ZUR AUFGESCHWEIßTEN GURTLAMELLE [QUELLEN IDS: #28, #29, #170, #274, #276, #1000, #1001, #1002] ..	184

BILD 6-131: „NORMALAUSFÜHRUNG“ DER GURTLAMELLE AUF WALZ- UND GESCHWEIßTEN TRÄGERN MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	185
BILD 6-132: AUSWERTUNG DER GEFILTERTEN VERSUCHSERGEBNISSE DER GURTLAMELLE IN „NORMALAUSFÜHRUNG“ (KERBDETAIL 6) [QUELLEN IDS: #28, #276].....	186
BILD 6-133: GURTLAMELLE MIT VERSTÄRKTER STIRNNAHT AUF WALZ- UND GESCHWEIßTEN TRÄGERN MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	187
BILD 6-134: GURTLAMELLE MIT VERSTÄRKTER STIRNNAHT AUF WALZ- UND GESCHWEIßTEN TRÄGERN MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-2/NA [94].....	188
BILD 6-135: SCHUBBEANSPRUCHE KEHLNÄHTE UND KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	188
BILD 6-136: GESCHWEIßTER I-TRÄGER MIT ERMÜDUNGSRISSE INFOLGE SCHUBBEANSPRUCHUNG DER LÄNGSVERLAUFENDEN KEHLNÄHTE [#297].....	189
BILD 6-137: DARSTELLUNG ALLER VORGEFILTERTEN EINZELVERSUCHSDATEN ZU SCHUBBEANSPRUCHTEN KEHLNÄHTEN (WIE GESCHWEIßT) [QUELLEN IDS: #86, #297, #298, #394, #395].....	190
BILD 6-138: KOPFBOLZENDÜBEL IN VERBUNDWIRKUNG UND KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	192
BILD 6-139: DARSTELLUNG ALLER EINZELVERSUCHSDATEN ZUM KERBDETAIL 10 – KOPFBOLZEN IN VERBUNDWIRKUNG UNTER SCHUBBEANSPRUCHUNG [QUELLEN IDS: #75, #124, #131, #291, #292, #1003].....	193
BILD 6-140: DARSTELLUNG UND AUSWERTUNG DER GEFILTERTEN PUSH-OUT-EINZELVERSUCHSDATEN NACH [#75].....	194
BILD 6-141: RINGFLANSCHANSCHLÜSSE UND KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	195
BILD 6-142: ROHR-BLECH-ANSCHLUSS MIT ZUSAMMENGEPRESSTEM ENDQUERSCHNITT UND STUMPFNAHTAUSFÜHRUNG MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	196
BILD 6-143: ALLE EINZELVERSUCHSDATEN ZUM ROHR-BLECH-ANSCHLUSS MIT ZUSAMMENGEPRESSTEM ENDQUERSCHNITT UND STATISTISCHE AUSWERTUNG (KERBDETAIL 1) [QUELLEN ID: #43].....	197
BILD 6-144: ROHR-BLECH-ANSCHLUSS, ROHR GESCHLITZT UND AN DAS BLECH GESCHWEIßT MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	198
BILD 6-145: VERSCHIEDENE AUSFÜHRUNGSVARIANTEN VON ROHR-BLECH-ANSCHLÜSSEN MIT GESCHLITZTEN ROHRENDEN – MIT DOPPELTER BLECHLASCHE (A) [#88] UND VERSCHLOSSENEM ROHRENDE (B) [#43].....	198
BILD 6-146: STÖßE AN HOHLPROFILIEN MIT DURCHGESCHWEIßTEN STUMPFNÄHTEN UND KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	200
BILD 6-147: DARSTELLUNG ALLER EINZELVERSUCHSDATEN ZUM KERBDETAIL 3 – STUMPFGESTOßENE KREISHOHLPROFILE (WIE GESCHWEIßT) [QUELLEN ID: #1028].....	200
BILD 6-148: KERBFALLABLEITUNG STUMPFGESTOßENER KREISHOHLPROFILE (KERBDETAIL 3) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE [QUELLEN ID: #1028].....	201

BILD 6-149: STUMPFGESTOßENE RECHTECKHOHLPROFILE MIT ERMÜDUNGSRISS AUSGEHEND VOM SCHWEIßNAHTÜBERGANG DER DECKLAGE (A) SOWIE VON DER SCHWEIßNAHTWURZEL (B) [#1011]	202
BILD 6-150: ALLE EINZELVERSUCHSDATEN UND STATISTISCHE AUSWERTUNG ZU KERBDDETAIL 4 – STÖßE AN RECHTECK-HOHLPROFILEN MIT DURCHGESCHWEIßTEN STUMPFNÄHTEN (WIE GESCHWEIßT, KERBDDETAIL 4) [QUELLEN IDS: #47, #48, #1009, #1011].....	203
BILD 6-151: MIT KEHLNÄHTEN AN EIN ANDERES BAUTEIL ANGESCHWEIßTES HOHLPROFIL MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1]	205
BILD 6-152: DARSTELLUNG ALLER EINZELVERSUCHSDATEN ZUM KERBDDETAIL 5 – HOHLPROFIL ALS ANBAUTEIL [QUELLEN IDS: #41, #1031].....	205
BILD 6-153: AUSWERTUNG DER GEFILTERTEN VERSUCHSERGEBNISSE – HOHLPROFIL ALS ANBAUTEIL (KERBDDETAIL 5) [QUELLEN IDS: #1031]	206
BILD 6-154: KOPFPLATTENSTÖßE AN HOHLPROFILEN MIT DURCHGESCHWEIßTEN HV-NÄHTEN UND KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	207
BILD 6-155: KOPFPLATTENSTÖßE AN HOHLPROFILEN MIT KEHLNÄHTEN UND KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	208
BILD 6-156: DARSTELLUNG ALLER EINZELVERSUCHSDATEN ZUM KERBDDETAIL 9 – KOPFPLATTENSTOß VON RECHTECKHOHLPROFILEN MIT KEHLNÄHTEN (WIE GESCHWEIßT) [QUELLEN IDS: #47, #48].....	208
BILD 6-157: KERBFALLABLEITUNG KOPFPLATTENSTOß VON RECHTECKHOHLPROFILEN MIT KEHLNÄHTEN (KERBDDETAIL 9) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE [QUELLEN IDS: #47, #48]	209
BILD 6-158: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „K- UND N-RUNDHOHLPROFIL-KNOTEN MIT SPALT“ #042 #043 #044 #051 #052 #289 #290 #1020	213
BILD 6-159: ROHRKNOTEN MIT RISSEN AM SCHWEIßNAHTÜBERGANG ZUM GURT #043 #044 #051 #1020 (V.L.O.N.R.U.).....	214
BILD 6-160: KERBFALLABLEITUNG „K- UND N-RUNDHOHLPROFIL-KNOTEN MIT SPALT“ MIT $t_{0ti} \geq 2,0$ (FALL A)) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #043 #051 #1020)	215
BILD 6-161: KERBFALLABLEITUNG „K- UND N-RUNDHOHLPROFIL-KNOTEN MIT SPALT“ MIT $t_{0ti} \leq 1,25$ (FALL B)) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #043 #290)	216
BILD 6-162: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „K- UND N-RECHTECK-KNOTEN MIT SPALT“ #047 #048	217
BILD 6-163: ROHRKNOTEN MIT RISSEN AM SCHWEIßNAHTÜBERGANG ZUM GURT #047 #048 (V.L.N.R.)	218
BILD 6-164: KERBFALLABLEITUNG „K- UND N-RECHTECK-KNOTEN MIT SPALT“ MIT $t_{0ti} \geq 2,0$ (FALL A)) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #048)	219
BILD 6-165: KERBFALLABLEITUNG „K- UND N-RECHTECK-KNOTEN MIT SPALT“ MIT $t_{0ti} = 1,0$ (FALL B)) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #047 #048)...	219

BILD 6-166: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „K-KNOTEN MIT ÜBERLAPPUNG“ #043 #044 #048 #050 #289 #1009 #1011	221
BILD 6-167: ROHRKNOTEN MIT RISSEN #043 #044 #1011 (2X) (V.L.O.N.R.U.).....	221
BILD 6-168: KERBFALLABLEITUNG „K- KNOTEN MIT ÜBERLAPPUNG“ MIT $t_{0ti} \geq 1,4$ (FALL A) ANHAND VERFÜGBARER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #043 #048).....	223
BILD 6-169: KERBFALLABLEITUNG „K- KNOTEN MIT ÜBERLAPPUNG“ MIT $t_{0ti} = 1,0$ (FALL B) ANHAND VERFÜGBARER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #044 #048 #1009 #1011)	223
BILD 6-170: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „N-KNOTEN MIT ÜBERLAPPUNG“ #048 #050 #051 #052	225
BILD 6-171: N-KNOTEN MIT RISS IM GURT #048	225
BILD 6-172: KERBFALLABLEITUNG „N-KNOTEN MIT ÜBERLAPPUNG“ MIT $t_{0ti} \geq 1,4$ (FALL A) ANHAND VERFÜGBARER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #048 #051).....	226
BILD 6-173: KERBFALLABLEITUNG „N-KNOTEN MIT ÜBERLAPPUNG“ MIT $t_{0ti} = 1,0$ (FALL B) ANHAND VERFÜGBARER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #048 #051).....	227
BILD 6-174: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „DURCHGEHENDE LÄNGSRIPPE MIT AUSSCHNITT IM QUERTRÄGER“ #360 #361 #362....	229
BILD 6-175: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISS #360.....	229
BILD 6-176: KERBFALLABLEITUNG „DURCHGEHENDE LÄNGSRIPPE MIT AUSSCHNITT IM QUERTRÄGER“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #360 #361 #362).....	230
BILD 6-177: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „DURCHGEHENDE LÄNGSRIPPE OHNE AUSSCHNITT IM QUERTRÄGER“ #354 #360 #361 #362	232
BILD 6-178: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISS #360.....	232
BILD 6-179: KERBFALLABLEITUNG „DURCHGEHENDE LÄNGSRIPPE OHNE AUSSCHNITT IM QUERTRÄGER“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #354 #360 #361 #362)	233
BILD 6-180: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „AM QUERTRÄGER STOßENDEN LÄNGSRIPPEN“ #354 #355	234
BILD 6-181: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSEN #355.....	234
BILD 6-182: KERBFALLABLEITUNG „AM QUERTRÄGER STOßENDEN LÄNGSRIPPEN“ MIT KEHLNÄHTEN (LINKS) UND STUMPFNÄHTEN (RECHTS) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDS: #354 #355).....	235
BILD 6-183: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „RIPPENSTOß MIT VOLL DURCHGESCHWEIßTER STUMPFNAHT MIT BADSICHERUNG“ #342 #343 #345 #346 #347 #348 #350 #351 #352 #373	237
BILD 6-184: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISS #342.....	237
BILD 6-185: VERSCHIEDENE AUSFÜHRUNGEN DES RIPPENSTOßES MIT BADSICHERUNG	238

BILD 6-186: KERBFALLABLEITUNG „RIPPENSTOß MIT VOLL DURCHGESCHWEIßTER STUMPFNAHT MIT BADSICHERUNG“ VARIANTE A UND B MIT $0 \leq g \leq 4 \text{ mm}$ (LINKS) UND $4 \leq g \leq 6 \text{ mm}$ (RECHTS) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #345 #346 #347 #348 #351 #352).....	239
BILD 6-187: KERBFALLABLEITUNG „RIPPENSTOß MIT VOLL DURCHGESCHWEIßTER STUMPFNAHT MIT BADSICHERUNG“ VARIANTE A UND B MIT $g > 6 \text{ mm}$ (LINKS) UND VARIANTE C (RECHTS) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #342 #345 #346 #350).....	239
BILD 6-188: KERBFALLABLEITUNG „RIPPENSTOß MIT VOLL DURCHGESCHWEIßTER STUMPFNAHT MIT BADSICHERUNG“ VARIANTE D UND E ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #373).....	240
BILD 6-189: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „VON BEIDEN SEITEN VOLL DURCHGESCHWEIßTE STUMPFNAHT OHNE BADSICHERUNG“ #350 #368 ...	241
BILD 6-190: KERBFALLABLEITUNG „VON BEIDEN SEITEN VOLL DURCHGESCHWEIßTE STUMPFNAHT OHNE BADSICHERUNG“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #350 #368).....	242
BILD 6-191: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „KRITISCHER SCHNITT IM QUERTRÄGERSTEG MIT AUSSCHNITTEN“ #343 #358 #359 #360 #365.....	244
BILD 6-192: KERBFALLABLEITUNG „KRITISCHER SCHNITT IM QUERTRÄGERSTEG MIT AUSSCHNITTEN“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #358 #359 #360 #365).....	245
BILD 6-193: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „VERSENKTE NAHT ZWISCHEN DECKBLECH UND TRAPEZ- ODER V-FÖRMIGER RIPPE“ #55 #331 #335 #336 #337 #368.....	246
BILD 6-194: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSEN IN DER RIPPE #55, IM DECKBLECH AM SCHWEIßNAHTÜBERGANG #331 UND IM DECKBLECH AN DER SCHWEIßNAHTWURZEL #331 (V.L.N.R.).....	247
BILD 6-195: KERBFALLABLEITUNG „VERSENKTE NAHT ZWISCHEN DECKBLECH UND TRAPEZ- ODER V-FÖRMIGER RIPPE“ RIPPENVERSAGEN MIT $0 \leq g \leq 2 \text{ mm}$ (LINKS) UND DECKBLECHVERSAGEN (RECHTS) ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #55 #331 #335 #336 #337).....	248
BILD 6-196: DARSTELLUNG ALLER VERSUCHSPUNKTE ZUM KONSTRUKTIONSDetail „KEHLNAHT ODER NICHT VOLL DURCHGESCHWEIßTE NAHT ZWISCHEN DECKBLECH UND TRAPEZ- ODER V-FÖRMIGER RIPPE“ #56 #331.....	250
BILD 6-197: PROBEKÖRPER MIT ERMÜDUNGSRISSEN #56.....	250
BILD 6-198: KERBFALLABLEITUNG „KEHLNAHT ODER NICHT VOLL DURCHGESCHWEIßTE NAHT ZWISCHEN DECKBLECH UND TRAPEZ- ODER V-FÖRMIGER RIPPE“ ANHAND GEFILTERTER VERSUCHSERGEBNISSE (QUELLEN IDs: #55 #331).....	251
BILD 7-1: YELLOW MILL POND BRIDGE (A), ERMÜDUNGSRISSEN (B), SCHEMATISCHE DARSTELLUNG (C) [111].....	257
BILD 7-2: UNTERSUCHTE ENDLAMELLENFORMEN: ZUGESPITZT (A), RUND (B), RECHTECKIG (C) [112].....	258

BILD 7-3: TRÄGERVERSUCHE FISHER [113] MIT BREITER (A) UND SCHMALER LAMELLE (B)	259
BILD 7-4: VERSUCHE BERGQVIST UND SPERLE [114] TRÄGERVERSUCHE (A) UND KLEINVERSUCHE.....	260
BILD 7-5: TRÄGERVERSUCHE BERGER [115] TRADITIONELL DEUTSCHE VARIANTE (A) UND VARIANTE OHNE ANFASUNG UND NACHBEARBEITUNG (B).....	261
BILD 7-6: ÜBERSICHT DER BEKANNTEN EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN AN GURLAMELLENENDEN. * REGRESSIONSGERADE MIT 50 % ÜBERLEBENSWAHRSCHEINLICHKEIT (M= 3). ** GURLAMELLENENDEN MIT BEARBEITETEN ODER VERSTÄRKTEN ENDEN, DIE JEDOCH NICHT ODER NICHT VOLLSTÄNDIG DER TRADITIONELL DEUTSCHEN VARIANTE ENTSPRECHEN.	262
BILD 7-7: KERBFALLEINSTUFUNGEN GURLAMELLENENDE NACH DIN EN 1993-1-9 [1]: EINFACHE UMSCHWEIßUNG ODER OHNE STIRNNAHT (A), VERSTÄRKTE STRINNAHT (B) ...	263
BILD 7-8: TRADITIONELL DEUTSCHE VARIANTE DES KONSTRUKTIONSDetails GURLAMELLENENDE: DEUTSCHER NATIONALER ANHANG EC 3 TEIL 2, 2010 [94] (A), DS 804, 1980 [117] (B), VORSCHRIFTEN FÜR GESCHWEIßTE EISENBAHNBRÜCKEN, 1955 [118] (C).....	263
BILD 7-9: KERBFALLEINSTUFUNGEN NACH DIN EN 13001-1-3 [18]: TRADITIONELL DEUTSCHE VARIANTE (A) VERSTÄRKTE ENDNAHT (B), EINFACHE UMSCHWEIßUNG (C)	264
BILD 7-10: PRÜFKÖRPERGEOMETRIEN.....	266
BILD 7-11: SCHWEIßVORBEREITUNGEN: ANGEHEFTETE GURLAMELLEN (O.L) UND (O.R.), SKIZZIEREN DER SCHWEIßNAHTGEOMETRIE (U.L) UND VORWÄRMEN (U.R.).....	267
BILD 7-12: SCHWEIßEN DER PRÜFKÖRPER: MESSEN VON ZWISCHENLAGENTEMPERATUREN (O.L.), SCHWEIßEN DER FLANKENNAHT (O.R.) UND (M.R.), STIRNNAHT WIE GESCHWEIßT UND UNGEREINIGT (M.R.), ENTFERNEN VON SCHLACKERESTEN MIT NADELPISTOLE (U.L.), STIRNNAHT IM SCHWEIßZUSTAND BELASSEN (U.R.).....	268
BILD 7-13: BEARBEITUNG DER OBERFLÄCHE MIT WINKELSCHLEIFER (O.L.), OBERFLÄCHE NACH GROBER BEARBEITUNG (O.R.), NACHBEARBEITUNG MIT ROLLENSCHLEIFER (U.L.), KERBFREI BEARBEITETES GURLAMELLENENDE (U.R.).....	269
BILD 7-14: PRÜFMASCHINEN: FA. SCHENK (LINKS), FA. LOSENHAUSEN (MITTE), FA. AMSLER (RECHTS)	270
BILD 7-15: ANORDNUNG DER DMS AUF VORDER- UND RÜCKSEITE	271
BILD 7-16: ANORDNUNG DER DMS ZUR MESSUNG VON STRUKTURSPANNUNGEN NACH [16].	272
BILD 7-17: MESSUNG DER STRUKTURSPANNUNGEN BEI PK 2.10	272
BILD 7-18: PRÜFKÖRPER KURZ VOR ERREICHEN DES VERSAGENSKRITERIUMS (PRÜFKÖRPERBRUCH) PK 2.8	273
BILD 7-19: BRUCHFLÄCHEN: RISSFRONTEN IM GRUNDBLECH: PK 2.1 (A), PK 2.10 (B), RISSFRONTEN IN DIE SCHWEIßNAHT BEI WURZELVERSAGEN: PK 3.6 (C)	276
BILD 7-20: MAKROSCHLIFFE MIT ERMÜDUNGSRISSEN: SERIE 1 (A), SERIE 2 (B), SERIE 3 (C).	277
BILD 7-21: DOKUMENTATION DER GEGENÜBERLIEGENDEN DMS 3 UND DMS 4 IM ABSTAND VON 100 MM VON PK 2.9	278

BILD 7-22: BLECHDICKENEINFLUSS: VERGLEICH DER REGRESSIONSGERADE SERIE 1 UND SERIE 2	279
BILD 7-23: BLECHDICKENEINFLUSS: ZWEISTICHPROBEN T-TEST	280
BILD 7-24: STATISTISCHE AUSWERTUNG SERIE 1	280
BILD 7-25: STATISTISCHE AUSWERTUNG SERIE 2	281
BILD 7-26: STATISTISCHE AUSWERTUNG SERIE 3	281
BILD 7-27: LOKALE VERFORMUNG DES GURTES IM FE GLOBALMODELL INFOLGE DER LOKALEN EXZENTRIZITÄT (VERFORMUNGEN ÜBERHÖHT)	285
BILD 7-28: STATISTISCHE AUSWERTUNG FÜR KERBFALLEMPFEHLUNG	286
BILD 8-1: BIEGESTEIFE STÖÙE VON KRANBAHNTRÄGERN IM FELD [123]	288
BILD 8-2: ABSTÜTZKRÄFTE BEI AUF ZUG BELASTETEN SCHRAUBENANSCHLÜßSEN	289
BILD 8-3: VERSPANNUNGSDREIECK	289
BILD 8-4: VERBINDUNG MIT BÜNDIGER UND ÜBERSTEHENDER STIRNPLATTE MIT BEZEICHNUNG DES L- UND T-MODELLS	290
BILD 8-5: SCHRAUBENKRAFTFUNKTION NACH PETERSEN [126]	291
BILD 8-6: ELASTO-STATISCHE THEORIE DES L-MODELLS NACH PETERSEN [126]	292
BILD 8-7: GROßPROBEKÖRPER A, B UND C, SOWIE KLEINPROBEKÖRPER LA, TB UND TC	294
BILD 8-8: VERSUCHSSTAND FÜR GROßPROBEKÖRPER MIT EINGEBAUTEM PROBEKÖRPER B..	296
BILD 8-9: STATISCHES SYSTEM UND BIEGELINIEN DES VERSUCHSSTANDES OHNE VORSPANNUNG (LINKS) UND MIT VORSPANNUNG (RECHTS)	296
BILD 8-10: UNWUCHTMOTOR (LINKS) UND VORSPANNEINRICHTUNG AM TRÄGERENDE (RECHTS)	297
BILD 8-11: VERSUCHSSTAND IM SPANNFELD	298
BILD 8-12: 4-SÄULEN-PRÜFMASCHINE FÜR KLEINPROBEKÖRPER MIT EINGEBAUTEM PROBEKÖRPER TC	298
BILD 8-13: DMS DER GROßPROBEKÖRPER IN ANSICHT UND DRAUFSICHT	300
BILD 8-14: DMS DER GROßPROBEKÖRPER IM QUERSCHNITT (LINKS) UND DMS DER KLEINPROBEKÖRPER (RECHTS)	300
BILD 8-15: VERSAGEN DES PROBEKÖRPERS C1	301
BILD 8-16: TYPISCHE VERSAGENSBILDER DER SERIE LA: SCHRAUBE (LINKS) UND SCHWEIßNAHTWURZEL (RECHTS)	303
BILD 8-17: SCHRAUBENKRAFTVERLÄUFE UND DMS VERLÄUFE DES PROBEKÖRPERS LA1 IN ABHÄNGIGKEIT DES PLANMÄßIGEN SCHRAUBENVORSPANNUNGSGRAD	304
BILD 8-18: TYPISCHE VERSAGENSBILDER DER SERIE TB	304
BILD 8-19: TYPISCHE VERSAGENSBILDER DER SERIE TC	305

BILD 8-20: DARSTELLUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE ALLER PROBEKÖRPER MIT VERSAGEN AM SCHWEIßNAHTÜBERGANG MIT NENNSPANNUNGEN (LINKS) UND KORRIGIERTEN NENNSPANNUNGEN (RECHTS).....	305
BILD 8-21: DARSTELLUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE ALLER PROBEKÖRPER MIT VERSAGEN AN DER SCHWEIßNAHTWURZEL (LINKS) UND MIT VERSAGEN DER SCHRAUBEN (RECHTS)	307
BILD 8-22: DARSTELLUNG DER FE-MODELLE UND DEREN RANDBEDINGUNGEN FÜR GROßBAUTEILE (LINKS) UND KLEINBAUTEILE (RECHTS) ANHAND DER A UND LA KONFIGURATIONEN	309
BILD 8-23: DISKRETISIERUNG DER FE-MODELLE FÜR GROßBAUTEILE (LINKS) UND KLEINBAUTEILE (MITTE) UND FÜR DAS SUBMODELL (RECHTS) ANHAND DER B UND TB KONFIGURATIONEN	310
BILD 8-24: LÄNGSSPANNUNGSPLOT DES PROBEKÖRPER C1 (LINKS) UND TC1 (RECHTS) MIT GLEICHER LEGENDE	312
BILD 8-25: VERGLEICH DER EXPERIMENTELL UND NUMERISCH BESTIMMTEN DEHNUNGEN AN PROBEKÖRPER B1.....	312
BILD 8-26: VERGLEICH DER EXPERIMENTELL UND NUMERISCH BESTIMMTEN DEHNUNGEN AN PROBEKÖRPER TB1	313
BILD 8-27: VERTEILUNG VON NENNSPANNUNGEN UND KORRIGIERTEN NENNSPANNUNGEN ÜBER DIE LÄNGE DES ZUGFLANSCHES BZW. ZUGBLECHS ALLER PROBEKÖRPER AUS SERIE C (LINKS) UND TC (RECHTS)	313
BILD 8-28: DARSTELLUNG DER NUMERISCH ERMITTELTEN SPANNUNGSSCHWINGBREITE IN SCHRAUBENMITTE UND -RAND ÜBER DIE KRAFT IM ZUGFLANSCHABSCHNITT VON B2 (LINKS) BZW. ZUGBLECH VON LA2 (RECHTS)	314
BILD 8-29: KERBSPANNUNGSPLOT DES PROBEKÖRPER C1 (LINKS) UND TC1 (RECHTS) AM SUBMODELL MIT GLEICHER LEGENDE.....	315
BILD 8-30: VERLAUF DER KERBSPANNUNGSSCHWINGBREITEN DES PROBEKÖRPERS B1 (LINKS) UND TB1 (RECHTS).....	315
BILD 8-31: VERGLEICH VON VERSUCHSERGEBNISSEN UND MITTELS KERBSPANNUNGSKONZEPT ERMITTELTEN ERMÜDUNGSFESTIGKEITEN FÜR DIE SCHWEIßNAHTWURZEL (LINKS) UND DEN SCHWEIßNAHTÜBERGANG (RECHTS).....	316
BILD 8-32: SPANNUNGSSCHWINGBREITE DER SCHRAUBE ÜBER NENNSPANNUNG AM FLANSCH (LINKS) UND STIRNPLATTENDICKE (RECHTS) FÜR VERSCHIEDENE STIRNPLATTENDICKEN T IN GROß- UND KLEINMODELLEN	318
BILD 8-33: MITTELS KERBSPANNUNGSKONZEPT BESTIMMTE KERBFORMZAHLEN (LINKS) UND KERBFÄLLE (RECHTS) DER VERSCHIEDENEN POTENTIELLEN VERSAGENSORTE IN ABHÄNGIGKEIT DER STIRNPLATTENDICKE IN GROß- UND KLEINMODELLEN	319
BILD 8-34: SPANNUNGSSCHWINGBREITE DER SCHRAUBE ÜBER NENNSPANNUNG IM FLANSCH IN ABHÄNGIGKEIT DES SCHRAUBENDURCHMESSERS IN GROß- UND KLEINMODELLEN	320
BILD 8-35: MITTELS KERBSPANNUNGSKONZEPT BESTIMMTE KERBFORMZAHLEN (LINKS) UND KERBFÄLLE (RECHTS) DER POTENTIELLEN VERSAGENSORTE IN ABHÄNGIGKEIT DES SCHRAUBENDURCHMESSERS IN GROß- UND KLEINMODELLEN.....	321

BILD 8-36: SPANNUNGSSCHWINGBREITE DER SCHRAUBE ÜBER NENNSPANNUNG IM FLANSCH IN ABHÄNGIGKEIT DES HORIZONTALEN LOCHABSTANDS IN GROßMODELLEN	322
BILD 8-37: MITTELS KERBSPANNUNGSKONZEPT BESTIMMTE KERBFORMZAHLEN (LINKS) UND KERBFÄLLE (RECHTS) DER VERSCHIEDENEN POTENTIELLEN VERSAGENSORTE IN ABHÄNGIGKEIT DES HORIZONTALEN LOCHABSTANDS IN GROßMODELLEN	322
BILD 8-38: SPANNUNGSSCHWINGBREITE DER SCHRAUBE ÜBER NENNSPANNUNG IM FLANSCH IN ABHÄNGIGKEIT DES VERTIKALEN LOCHABSTANDS IN GROß- UND KLEINMODELLEN	323
BILD 8-39: MITTELS KERBSPANNUNGSKONZEPT BESTIMMTE KERBFORMZAHLEN (LINKS) UND KERBFÄLLE (RECHTS) DER VERSCHIEDENEN VERSAGENSORTE IN ABHÄNGIGKEIT DES VERTIKALEN LOCHABSTANDS IN GROß- UND KLEINMODELLEN	324
BILD 8-40: SPANNUNGSSCHWINGBREITE DER SCHRAUBE ÜBER NENNSPANNUNG IM FLANSCH IN ABHÄNGIGKEIT DER PROFILGRÖßE IN GROß- UND KLEINMODELLEN	324
BILD 8-41: MITTELS KERBSPANNUNGSKONZEPT BESTIMMTE KERBFORMZAHLEN (LINKS) UND KERBFÄLLE (RECHTS) DER POTENTIELLEN VERSAGENSORTE IN ABHÄNGIGKEIT DER PROFILGRÖßE IN GROß- UND KLEINMODELLEN	325
BILD 8-42: SPANNUNGSSCHWINGBREITE DER SCHRAUBE ÜBER DIE NENNSPANNUNG IM FLANSCH IN ABHÄNGIGKEIT DER DIMENSION DER VERBINDUNG IN GROßMODELLEN	326
BILD 8-43: PROGNOSE DER SCHRAUBENKRAFT ANHAND VOM MODELL NACH PETERSEN UND NUMERISCHEN SIMULATIONEN DER GROßMODELLE	327
BILD 8-44: MITTELS KERBSPANNUNGSKONZEPT BESTIMMTE KERBFORMZAHLEN (LINKS) UND KERBFÄLLE (RECHTS) DER POTENTIELLEN VERSAGENSORTE IN ABHÄNGIGKEIT DER PROFILGRÖßE IN GROßMODELLEN	327
BILD 9-1: UNTERSUCHUNG DES DURCHMESSEREINFLUSSES DES DETAILS 14 DER TABELLE 8.1	331
BILD 9-2: UNTERSUCHUNG DES BAUTEILEINFLUSSES DES DETAILS 2 (LINKS) UND DETAIL 5 (RECHTS) DER TABELLE 8.2	332
BILD 9-3: BLECHDICKENEINFLUSS AN EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN FÜR KERBFREI BEARBEITETE STUMPFSTÖßE (A) UND IM SCHWEIßZUSTAND BELASSENE STUMPFSTÖßE (B)	333
BILD 9-4: BLECHDICKENEINFLUSS STUMPFSTOß IM SCHWEIßZUSTAND BELASSEN, VERGLEICH DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN MIT EUROCODE UND FE MODELL	334
BILD 9-5: MODEL FÜR GEOMETRISCHEN ZUSAMMENHANG VON SCHWEIßNAHTANSTIEGSWINKEL, - BREITE UND - HÖHE.	335
BILD 9-6: EINFLUSS DES NAHTANSTIEGSWINKELS FÜR STUMPFSTÖßE IM SCHWEIßZUSTAND BELASSEN IM VERGLEICH MIT ERGEBNISSEN AUS DEM FE KERBSPANNUNGSMODEL (QUELLEN IDS: #63, #272, #308).....	336
BILD 9-7: NORMIERTE VERSUCHSWERTE IN ABHÄNGIGKEIT DER LÄNGE DER LÄNGSSTEIFE (QUELLEN IDS: 47, 139, 143, 145, 148, 149, 150, 151, 153, 158, 164, 260).....	337
BILD 9-8: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN LÄNGSNÄHTEN VON FISHER [148]	337
BILD 9-9: VERGLEICH DER EUROCODE 3 EINSTUFUNG MIT DEN ERGEBNISSE DER FE SIMULATION UND KERBSPANNUNGSWÖHLERLINIE FAT 225	338

BILD 9-10: UNTERSUCHUNG DES LÄNGENEINFLUSSES (ABSTAND DER SCHWEIßNAHTÜBERGÄNGE L) VON DETAIL 1 (TABELLE 8.5)	339
BILD 9-11: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES VERSCHIEDENER PROBEKÖRPERTYPEN VON DETAIL 8 (TABELLE 8.5).....	340
BILD 9-12: UNTERSUCHUNG DES WANDDICKENEINFLUSSES T VON DETAIL 3 (TABELLE 8.6)..	341
BILD 9-13: UNTERSUCHUNG DES WANDDICKENEINFLUSSES T VON DETAIL 4 (TABELLE 8.6)..	341
BILD 9-14: UNTERSUCHUNG DES WANDDICKENEINFLUSSES T VON DETAIL 4 (TABELLE 8.6)..	342
BILD 9-15: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DES WANDSTÄRKENVERHÄLTNISSES DES DETAILS 1 (LINKS) UND DETAILS 2 (RECHTS) DER TABELLE 8.7	343
BILD 9-16: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER GURTWANDSTÄRKE DES DETAILS 1 (LINKS) UND DETAILS 4 (RECHTS) DER TABELLE 8.7	343
BILD 9-17: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DES VERHÄLTNIS $b_{0t0} \cdot t_{0ti}$ BZW. $d_{0t0} \cdot t_{0ti}$ DES DETAILS 1 (LINKS) UND DETAILS 2 (RECHTS) DER TABELLE 8.7	344
BILD 9-18: UNTERSUCHUNG DES MITTELSPANNUNGSEINFLUSSES DES DETAILS 2 (LINKS) UND DETAILS 5 (RECHTS) DER TABELLE 8.1	345
BILD 9-19: UNTERSUCHUNG DES MITTELSPANNUNGSEINFLUSSES DES DETAILS 14 DER TABELLE 8.1	345
BILD 9-20: UNTERSUCHUNG DES MITTELSPANNUNGSEINFLUSSES DES DETAILS 3 (LINKS) UND DETAILS 5 (RECHTS) DER TABELLE 8.2.....	346
BILD 9-21: UNTERSUCHUNG DES MITTELSPANNUNGSEINFLUSSES BEI DETAIL 3 (TABELLE 8.5)	347
BILD 9-22: HAIGH-DIAGRAMM – DARSTELLUNG DER MITTELSPANNUNGSABHÄNGIGKEIT VON DETAIL 3 (TABELLE 8.5).....	348
BILD 9-23: UNTERSUCHUNG DES LÄNGENEINFLUSSES (ABSTAND DER SCHWEIßNAHTÜBERGÄNGE L) VON DETAIL 1 (TABELLE 8.5)	349
BILD 9-24: UNTERSUCHUNG DES MITTELSPANNUNGSEINFLUSSES DES DETAILS 3 (LINKS) UND DETAILS 4 (RECHTS) DER TABELLE 8.7	349
BILD 9-25: UNTERSUCHUNG DES STRECKGRENZENEINFLUSSES DES DETAILS 2 (LINKS) UND DETAILS 4 (RECHTS) DER TABELLE 8.1	350
BILD 9-26: UNTERSUCHUNG DES STRECKGRENZENEINFLUSSES DES DETAILS 8 (LINKS) UND DETAILS 14 (RECHTS) DER TABELLE 8.1	351
BILD 9-27: STRECKGRENZENEINFLUSS KERBFREI BEARBEITETER STUMPFSTOß (A) UND IM SCHWEIßZUSTAND BELASSENER STUMPFSTOß (B).....	352
BILD 9-28: STRECKGRENZENEINFLUSS UNTER GLEICHBLEIBENDEN RANDBEDINGUNGEN NACH [39].....	353
BILD 9-29: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER RAUTIEFE (LINKS) UND DER SCHNITTGESCHWINDIGKEIT (RECHTS) DES DETAILS 5 DER TABELLE 8.1	354
BILD 9-30: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER FEUERVERZINKUNG DES DETAILS 8 (LINKS) UND DES DETAILS 11 (RECHTS) DER TABELLE 8.1	354

BILD 9-31: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER FERTIGUNG DER LÖCHER DES DETAILS 8 (LINKS) UND DES DETAILS 11 (RECHTS) DER TABELLE 8.1	355
BILD 9-32: UNTERSUCHUNG DER VORSPANNUNG DES DETAILS 11 DER TABELLE 8.1	356
BILD 9-33: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER FEUERVERZINKUNG DES DETAILS 14 DER TABELLE 8.1.....	356
BILD 9-34: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER GEWINDEHERSTELLUNG DES DETAILS 14 DER TABELLE 8.1	357
BILD 9-35: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES VERSCHIEDENER SCHWEIßVERFAHREN VON DETAIL 3 (TABELLE 8.5).....	358
BILD 9-36: UNTERSUCHUNG DES EINFLUSS DES WURZELSPALTS DES DETAILS 4 DER TABELLE 8.8	358
BILD 23-1: DARSTELLUNG DER STATISTISCHE AUSWERTUNG VON ERMÜDUNGSVERSUCHEN ..	465
BILD 24-1: UNTERSEITE „TEST DATA“ – 1. ABSCHNITT	466
BILD 24-2: UNTERSEITE „TEST DATA“ – 2. ABSCHNITT	467
BILD 24-3: UNTERSEITE „OVERVIEW“	468
BILD 24-4: UNTERSEITE „LIST OF SOURCES“	468
BILD 24-5: INFORMATIONSEITE „INFORMATION“	469
BILD 24-6: UNTERSEITE „SEARCH SERIES“	470
BILD 24-7: UNTERSEITE „OVERVIEW SEARCH“	471
BILD 24-8: UNTERSEITE „EVALUATION“ – ABFRAGE	472
BILD 24-9: UNTERSEITE „EVALUATION“ – AUSWERTUNG EINER SERIE	473
BILD 24-10: UNTERSEITE „INSERT NEW SOURCE“	474
BILD 24-11: UNTERSEITE „INSERT GENERAL DATA“	475
BILD 24-12: UNTERSEITE „INSERT TEST DATA“	475
BILD 25-1: GROßPROBEKÖRPER A, B UND C.....	476
BILD 25-2: GROßPROBEKÖRPER A, B UND C MIT DETAILS.....	477
BILD 25-3: ABMESSUNGEN DER STIRNPLATTENVERBINDUNGEN A, B UND C.....	477
BILD 25-4: KLEINPROBEKÖRPER LA, TB UND TC	478
BILD 25-5: ABMESSUNGEN DER STÖßE LA, TB UND TC.....	478
BILD 25-6: SCHWEIßNAHTDETAILS.....	479
BILD 25-7: VERHÄLTNIS VON KRAFT ZU DEHNUNG WÄHREND DER KALIBRATION DER MESSSCHRAUBEN.....	483
BILD 25-8: DMS1 – DMS 4A EINES GROßPROBEKÖRPERS	483
BILD 25-9: MESSSCHRAUBE DMS 5 EINES GROßPROBEKÖRPERS	484
BILD 25-10: MESSSCHRAUBE DMS 1S UND DMS 2 UND DMS 3 EINES KLEINPROBEKÖRPERS	484

BILD 25-11: VERSAGEN DES PROBEKÖRPERS A1	485
BILD 25-12: VERSAGEN DES PROBEKÖRPERS A2	485
BILD 25-13: VERSAGEN DES PROBEKÖRPERS B1	486
BILD 25-14: VERSAGEN DES PROBEKÖRPERS B2	486
BILD 25-15: VERSAGEN DES PROBEKÖRPERS C2	487
BILD 26-1: PARAMETER BESCHREIBUNG	489
BILD 26-2: KERBGEOMETRIE	490
BILD 26-3: VALIDIERUNG	491
BILD 26-4: VERGLEICHSMODELL NACH RADAJ [152]	491
BILD 27-1: GEOMETRISCHE DEFINITION STUMPFSTOß	493
BILD 27-2: FE MODELL	494
BILD 27-3: REFERENZMODEL (A) UND UMSETZUNG (B)	495
BILD 27-4: NETZFEINHEIT	496
BILD 27-5: SENSITIVITÄTSANALYSE	496
BILD 27-6: BLECHDICKENEINFLUSS IN DER FE	497
BILD 27-7: BLECHDICKENEINFLUSS NORMATIV, NUMERISCH UND EXPERIMENTELL	498
BILD 27-8: KERBSPANNUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT DES NAHTANSTIEGSWINKELS	499
BILD 27-9: ERMÜDUNGSFESTIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT DES NAHTANSTIEGSWINKEL	499
BILD 27-10: GERINGER (A) UND GROßER (B) NAHTANSTIEGSWINKEL	500
BILD 28-1: FE MODELL DER LÄNGSSTEIFE (A) UND REFERENZGEOMTRIE (B)	501
BILD 28-2: GLOBALMODELL (A) UND SUBMODELL DER LÄNGSSTEIFE	502
BILD 28-3: SPANNUNGSKONZENTRATIONSFAKTOR B IN ABHÄNGIGKEIT DER STEIFENLÄNGE ..	503

Tabellenverzeichnis

List of tables

TABELLE 2-1: SPANNUNGSVERHÄLTNIS R IN ABHÄNGIGKEIT DER BEANSPRUCHUNGSART.....	6
TABELLE 2-2: EMPFEHLUNGEN FÜR γ_{MF} -FAKTOREN FÜR DIE ERMÜDUNGSFESTIGKEIT	8
TABELLE 2-3: TABELLEN DES KERBFALLKATALOGS IN DIN EN 1993-1-9 [1]	13
TABELLE 2-4: AUSZUG DES KERBFALLKATALOGS DER DIN EN 1993-1-9 - TABELLE 8.1 - DETAIL 14 [1]	13
TABELLE 2-5: DICKENKORREKTUREXONENT NACH IIW-EMPFEHLUNGEN [16]	17
TABELLE 2-6: KATEGORISIERUNGS- UND BEWERTUNGSVERFAHREN FÜR SCHWEIßIMPERFEKTIONEN [16].....	18
TABELLE 2-7: KATEGORISIERUNGS- UND BEWERTUNGSVERFAHREN FÜR SCHWEIßIMPERFEKTIONEN [22].....	24
TABELLE 2-8: EMPFEHLUNGEN FÜR ELEMENTGRÖßEN (LÄNGS UND QUER ZUR KERBOBERFLÄCHE) [23].....	30
TABELLE 3-1: K_N FAKTOR FÜR CHARAKTERISTISCHE WERTE MIT 95 % ÜBERLEBENSWAHRSCHEINLICHKEIT (AUSZUG AUS EUROCODE 0 [52])	42
TABELLE 3-2: DATENSATZ FÜR STATISTISCHE AUSWERTUNG	44
TABELLE 4-1: ENTHALTENE INFORMATIONEN EINER SERIE, JE NACH INFORMATIONSKATEGORIE	49
TABELLE 4-2: VERSAGENSKRITERIEN.....	50
TABELLE 4-3: BEZEICHNUNG UND ZWECK DER TABELLENELEMENTE IN DER MYSQL DATENBANK	52
TABELLE 6-1: GEWALZTE ODER GEPRESSTE ERZEUGNISSE NACH DIN EN 1993-1-9	61
TABELLE 6-2: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „WALZPROFIL“	61
TABELLE 6-3: MASCHINELL GESCHERTE ODER BRENNGESCHNITTENE BLECHE MIT NACHTRÄGLICHER MECHANISCHER BEARBEITUNG NACH DIN EN 1993-1-9	63
TABELLE 6-4: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „MASCHINELL BRENNGESCHNITTENE BLECHE MIT NACHTRÄGLICHER MECHANISCHER BEARBEITUNG“	64
TABELLE 6-5: GESCHERTE ODER BRENNGESCHNITTENE BLECHE MIT BRENNRIEFEN ODER VON HAND GESCHNITTEN UND NACHTRÄGLICH BEARBEITET NACH DIN EN 1993-1-9.....	66
TABELLE 6-6: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „BRENNGESCHNITTENE BLECHE MIT BRENNRIEFEN ODER VON HAND GESCHNITTEN UND NACHTRÄGLICH BEARBEITET“	67
TABELLE 6-7: SYMMETRISCHE ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT VORGESPANNTEN SCHRAUBEN NACH DIN EN 1993-1-9	69
TABELLE 6-8: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „SYMMETRISCHE ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT VORGESPANNTEN SCHRAUBEN“	69

TABELLE 6-9: ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT PASS- ODER NICHT VORGESPANNTEN INJEKTIONSSCHRAUBEN NACH DIN EN 1993-1-9	72
TABELLE 6-10: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT PASS- ODER NICHT VORGESPANNTEN INJEKTIONSSCHRAUBEN“	72
TABELLE 6-11: BAUTEILE MIT LÖCHERN NACH DIN EN 1993-1-9	75
TABELLE 6-12: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „BAUTEILE MIT LÖCHERN“	75
TABELLE 6-13: EINSCHNITTIGE ODER SYMMETRISCHE ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT LOCHSPIEL UND NICHT VORGESPANNTEN SCHRAUBEN NACH DIN EN 1993-1-9.....	77
TABELLE 6-14: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „EINSCHNITTIGE ODER SYMMETRISCHE ZWEISCHNITTIGE VERBINDUNG MIT LOCHSPIEL UND NICHT VORGESPANNTEN SCHRAUBEN“	78
TABELLE 6-15: SCHRAUBEN UND GEWINDESTANGEN UNTER ZUG NACH DIN EN 1993-1-9.....	80
TABELLE 6-16: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „SCHRAUBEN UND GEWINDESTANGEN UNTER ZUG“	80
TABELLE 6-17: SCHRAUBEN IN SCHER-LOCHLEIBUNGSVERBINDUNGEN NACH DIN EN 1993-1-9	82
TABELLE 6-18: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „SCHRAUBEN IN SCHER-LOCHLEIBUNGSVERBINDUNGEN“	83
TABELLE 6-19: MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE KEHLNÄHTE OHNE ANSATZSTELLEN NACH DIN EN 1993-1-9	85
TABELLE 6-20: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE KEHLNÄHTE OHNE ANSATZSTELLEN“	85
TABELLE 6-21: MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE DOPPELKEHLNÄHTE ODER BEIDSEITIG DURCHGESCHWEIßTE NÄHTE MIT ANSATZSTELLEN NACH DIN EN 1993-1-9	88
TABELLE 6-22: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE DOPPELKEHLNÄHTE ODER BEIDSEITIG DURCHGESCHWEIßTE NÄHTE MIT ANSATZSTELLEN“	88
TABELLE 6-23: HANDGESCHWEIßTE KEHLNÄHTE ODER HV-NÄHTE ODER DHV-NÄHTE NACH DIN EN 1993-1-9	90
TABELLE 6-24: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „HANDGESCHWEIßTE KEHLNÄHTE ODER HV-NÄHTE ODER DHV-NÄHTE“	91
TABELLE 6-25: UNTERBROCHENE LÄNGSNÄHTE NACH DIN EN 1993-1-9	93
TABELLE 6-26: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „UNTERBROCHENE LÄNGSNÄHTE“	93
TABELLE 6-27: LÄNGSNÄHTE, KEHLNÄHTE ODER UNTERBROCHENE NÄHTE MIT FREISCHNITTEN NACH DIN EN 1993-1-9	94
TABELLE 6-28: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „LÄNGSNÄHTE, KEHLNÄHTE ODER UNTERBROCHENE NÄHTE MIT FREISCHNITTEN“	95
TABELLE 6-29: LÄNGSBEANSPRUCHE STUMPFNAHT NACH DIN EN 1993-1-9	97

TABELLE 6-30: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „LÄNGSBEANSPRUCHTE STUMPFNAHT“	98
TABELLE 6-31: MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE LÄNGSNAHT IN HOHLPROFILIEN NACH DIN EN 1993-1-9	100
TABELLE 6-32: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „MIT AUTOMATEN ODER VOLL MECHANISIERT GESCHWEIßTE LÄNGSNAHT IN HOHLPROFILIEN“	101
TABELLE 6-33: KERBFREI BEARBEITETE STUMPFSTÖßE MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1]	103
TABELLE 6-34: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „KERBFREI BEARBEITETE STUMPFSTÖßE“	104
TABELLE 6-35: STUMPFSTÖßE IN BLECHEN UND FLACHSTÄHLEN MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	108
TABELLE 6-36: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: STUMPFSTÖßE IN BLECHEN UND FLACHSTÄHLEN“	108
TABELLE 6-37: STUMPFSTÖßE MIT GEOMETRIEÄNDERUNG NACH [1]	112
TABELLE 6-38: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „STUMPFSTOß MIT GEOMETRIEÄNDERUNG“ .	112
TABELLE 6-39: VOLLSTOß WALZPROFIL [1]	115
TABELLE 6-40: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „80309“ – VOLLSTÖßE IN WALZPROFILIEN“ ..	116
TABELLE 6-41: VOLLSTOß VON WALZPROFILIEN MIT FREISCHNITT NACH [1].....	118
TABELLE 6-42: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: STUMPFSTÖßE IN GESCHWEIßTEN PROFILIEN MIT FREISCHNITT	118
TABELLE 6-43: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: STUMPFSTÖßE IN GESCHWEIßTEN PROFILIEN MIT FREISCHNITT	120
TABELLE 6-44: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: EINSEITIG GESCHWEIßTE STUMPFNÄHTE MIT KERAMISCHER SCHWEIßBADSICHERUNG	123
TABELLE 6-45: STUMPFSTÖßE MIT VERBLEIBENDER SCHWEIßBADSICHERUNG NACH [1]	126
TABELLE 6-46: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: EINSEITIG GESCHWEIßTE STUMPFNÄHTE MIT KERAMISCHER SCHWEIßBADSICHERUNG	126
TABELLE 6-47: STUMPFSTÖßE MIT DICKENSPRUNG [1].....	129
TABELLE 6-48: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: STUMPFSTÖßE MIT DICKENSPRUNG.....	130
TABELLE 6-49: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: LAMELLENSTOß	132
TABELLE 6-50: LÄNGSSTEIFE MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	134
TABELLE 6-51: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: KONSTRUKTIONSDetail LÄNGSSTEIFE.....	134
TABELLE 6-52: LÄNGSSTEIFE MIT KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1].....	139
TABELLE 6-53: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: KONSTRUKTIONSDetail LÄNGSSTEIFE MIT ANFASUNG	140
TABELLE 6-54: LÄNGSSTEIFE MIT RADIUS UND GESCHLIFFENEM KERBÜBERGANG: KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1]	143
TABELLE 6-55: LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND: KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1]	144

TABELLE 6-56: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: KONSTRUKTIONSDetail LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND.....	145
TABELLE 6-57: LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND MIT RADIUS UND GESCHLIFFENEM KERBÜBERGANG: KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1]	149
TABELLE 6-58: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND MIT RADIUS UND GESCHLIFFENEM KERBÜBERGANG	151
TABELLE 6-59: QUERSTEIFE AUF BLECHEN: KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1]	154
TABELLE 6-60: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: KONSTRUKTIONSDetail LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND.....	154
TABELLE 6-61: VERTIKALSTEIFEN IN WALZ- ODER GESCHWEIßTEN BIEGETRÄGERN: KERBFALLEINSTUFUNG NACH DIN EN 1993-1-9 [1]	160
TABELLE 6-62: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: KONSTRUKTIONSDetail VERTIKALSTEIFEN IN WALZ- ODER GESCHWEIßTEN TRÄGERN.....	160
TABELLE 6-63: KOPFBOLZENDÜBEL NACH DIN EN 1993-1-9 [1]	164
TABELLE 6-64: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: KONSTRUKTIONSDetail LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND.....	164
TABELLE 6-65: GEOMETRIEANFORDERUNGEN AN ROHRKNOTEN IN TABELLE 8.7 IN DIN EN 1993-1-9.....	211
TABELLE 6-66: ZUSAMMENFASSUNG DER ERFÜLLUNG VON GEOMETRIEANFORDERUNGEN ...	212
TABELLE 6-67: K- UND N-RUNDHOHLPROFIL-KNOTEN MIT SPALT NACH DIN EN 1993-1-9 ...	212
TABELLE 6-68: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „K- UND N-RUNDHOHLPROFIL-KNOTEN MIT SPALT“	213
TABELLE 6-69: K- UND N-RECHTECK-KNOTEN MIT SPALT NACH DIN EN 1993-1-9.....	217
TABELLE 6-70: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „K- UND N-RECHTECK-KNOTEN MIT SPALT“	217
TABELLE 6-71: K-KNOTEN MIT ÜBERLAPPUNG NACH DIN EN 1993-1-9.....	220
TABELLE 6-72: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „K-KNOTEN MIT ÜBERLAPPUNG“	220
TABELLE 6-73: N-KNOTEN MIT ÜBERLAPPUNG NACH DIN EN 1993-1-9.....	224
TABELLE 6-74: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „N-KNOTEN MIT ÜBERLAPPUNG“	224
TABELLE 6-75: DURCHGEHENDE LÄNGSRIPPE MIT AUSSCHNITT IM QUERTRÄGER NACH DIN EN 1993-1-9.....	228
TABELLE 6-76: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „DURCHGEHENDE LÄNGSRIPPE MIT AUSSCHNITT IM QUERTRÄGER“	228
TABELLE 6-77: DURCHGEHENDE LÄNGSRIPPE OHNE AUSSCHNITT IM QUERTRÄGER NACH DIN EN 1993-1-9.....	231
TABELLE 6-78: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „DURCHGEHENDE LÄNGSRIPPE OHNE AUSSCHNITT IM QUERTRÄGER“	231
TABELLE 6-79: AM QUERTRÄGER STOßENDEN LÄNGSRIPPEN NACH DIN EN 1993-1-9.....	233

TABELLE 6-80: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „AM QUERTRÄGER STOßENDEN LÄNGSRIPPEN“	234
TABELLE 6-81: RIPPENSTOß MIT VOLL DURCHGESCHWEIßTER STUMPFNAHT MIT BADSICHERUNG NACH DIN EN 1993-1-9	236
TABELLE 6-82: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „RIPPENSTOß MIT VOLL DURCHGESCHWEIßTER STUMPFNAHT MIT BADSICHERUNG“	236
TABELLE 6-83: VON BEIDEN SEITEN VOLL DURCHGESCHWEIßTE STUMPFNAHT OHNE BADSICHERUNG NACH DIN EN 1993-1-9	241
TABELLE 6-84: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „VON BEIDEN SEITEN VOLL DURCHGESCHWEIßTE STUMPFNAHT OHNE BADSICHERUNG“	241
TABELLE 6-85: KRITISCHER SCHNITT IM QUERTRÄGERSTEG MIT AUSSCHNITTEN NACH DIN EN 1993-1-9.....	243
TABELLE 6-86: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „KRITISCHER SCHNITT IM QUERTRÄGERSTEG MIT AUSSCHNITTEN“.....	243
TABELLE 6-87: VERSENKTE NAHT ZWISCHEN DECKBLECH UND TRAPEZ- ODER V-FÖRMIGER RIPPE NACH DIN EN 1993-1-9.....	245
TABELLE 6-88: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „VERSENKTE NAHT ZWISCHEN DECKBLECH UND TRAPEZ- ODER V-FÖRMIGER RIPPE“	246
TABELLE 6-89: KEHLNAHT ODER NICHT VOLL DURCHGESCHWEIßTE NAHT ZWISCHEN DECKBLECH UND TRAPEZ- ODER V-FÖRMIGER RIPPE NACH DIN EN 1993-1-9.....	249
TABELLE 6-90: ÜBERSICHT DATENGRUNDLAGE: „KEHLNAHT ODER NICHT VOLL DURCHGESCHWEIßTE NAHT ZWISCHEN DECKBLECH UND TRAPEZ- ODER V-FÖRMIGER RIPPE“	249
TABELLE 6-91: DETAILS ZUM ANSCHLUSS EINER LÄNGSRIPPE AN DEN QUERTRÄGER NACH DIN EN 1993-1-9.....	252
TABELLE 6-92: DETAILS ZUM ANSCHLUSS EINER LÄNGSRIPPE AN DEN QUERTRÄGER NACH ENV 1993-2.....	253
TABELLE 6-93: DETAILS ZUM ANSCHLUSS EINER LÄNGSRIPPE AN DEN QUERTRÄGER NACH DIN FACHBERICHT 103-2009.....	254
TABELLE 7-1: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN PRÜFKÖRPER	266
TABELLE 7-2: ÜBERSICHT PRÜFMASCHINENBELEGUNG	270
TABELLE 7-3: ÜBERSICHT VERSUCHSERGEBNISSE	274
TABELLE 7-4: BLECHDICKENEINFLUSS IN DER FE.....	283
TABELLE 7-5: NAHTGEOMETRIE IN DER FE.....	283
TABELLE 7-6: KERBSCHÄRFE UND SCHWEIßNAHTDICKE IN DER FE.....	284
TABELLE 7-7: MODELLIERUNG GURTLAMELLENENDE IN TRÄGERGEOMETRIE IN DER FE	285
TABELLE 7-8: KERBFALLVORSCHLAG	286
TABELLE 8-1: VORSPANNKRÄFTE NACH EN 1090-2 [99] UND DIN EN 1993-1-8/NA [125]...	290

TABELLE 8-2: VERSUCHSERGEBNISSE DER GROßPROBEKÖRPER	301
TABELLE 8-3: VERSUCHSERGEBNISSE DER KLEINPROBEKÖRPER	302
TABELLE 8-4: VERSCHIEDENE ERMÜDUNGS-AUSWERTUNGEN DER PROBEKÖRPER MIT VERSAGEN AM SCHWEIßNAHTÜBERGANG (DETAIL 1 UND DETAIL 2, TABELLE 8.5 [1]) ...	306
TABELLE 8-5: VERSCHIEDENE ERMÜDUNGS-AUSWERTUNGEN DER PROBEKÖRPER MIT VERSAGEN AN DER SCHWEIßNAHTWURZEL (DETAIL 3, TABELLE 8.5 [1])	307
TABELLE 8-6: VERSCHIEDENE ERMÜDUNGS-AUSWERTUNGEN DER PROBEKÖRPER MIT VERSAGEN DER SCHRAUBE (DETAIL 14, TABELLE 8.1)	308
TABELLE 8-7: KERBFALLVORSCHLAG STIRNPLATTENVERBINDUNG MIT VORGESpanNTEN SCHRAUBEN IN TABELLE 8.5	329
TABELLE 10-1: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 2	359
TABELLE 10-2: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 4	360
TABELLE 10-3: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 5	360
TABELLE 10-4: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 8	361
TABELLE 10-5: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 9	361
TABELLE 10-6: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 11	362
TABELLE 10-7: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 13	362
TABELLE 10-8: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 14	363
TABELLE 10-9: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 15	363
TABELLE 10-10: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 2	364
TABELLE 10-11: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 3	365
TABELLE 10-12: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 5	365
TABELLE 10-13: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 8	366
TABELLE 10-14: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 9	367
TABELLE 10-15: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 10	367
TABELLE 10-16: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 11	368
TABELLE 10-17: KERBFALLVORSCHLAG STUMPFSTOß	369
TABELLE 10-18: KERBFALLVORSCHLAG VOLLSTÖßE VON WALZPROFILIEN MIT FREISCHNITT ..	369
TABELLE 10-19: KERBFALLVORSCHLAG STUMPFSTOß MIT SCHWEIßBADSICHERUNG	370
TABELLE 10-20: KERBFALLVORSCHLAG STUMPFSTOß, EINSEITIG OHNE SCHWEIßBADSICHERUNG	370
TABELLE 10-21: KERBFALLVORSCHLAG STUMPFSTOß MIT GEOMETRIEÄNDERUNG IN BREITE ODER DICKE	371
TABELLE 10-22: KERBFALLVORSCHLAG STUMPFSTOß MIT SCHWEIßBADSICHERUNG UND GEOMETRIEÄNDERUNG	371
TABELLE 10-23: KERBFALLVORSCHLAG STUMPFSTOß MIT DICKENSPRUNG	372

TABELLE 10-24: KERBFALLVORSCHLAG LAMELLENSTOß	372
TABELLE 10-25: KERBFALLVORSCHLAG LÄNGSSTEIFE	373
TABELLE 10-26: KERBFALLVORSCHLAG LÄNGSSTEIFE MIT ENDVERSTÄRKUNG	373
TABELLE 10-27: KERBFALLVORSCHLAG LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND	374
TABELLE 10-28: KERBFALLVORSCHLAG LÄNGSSTEIFE AM BAUTEILRAND	374
TABELLE 10-29: KERBFALLVORSCHLAG: QUERSTEIFE.....	375
TABELLE 10-30: KERBFALLVORSCHLAG: KOPFBOLZEN UND SCHWEIßBUTZEN	376
TABELLE 10-31: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 1.....	377
TABELLE 10-32: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 3.....	378
TABELLE 10-33: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 5.....	378
TABELLE 10-34: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 6.....	379
TABELLE 10-35: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 8.....	379
TABELLE 10-36: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 10.....	380
TABELLE 10-37: KERBFALLVORSCHLAG GURTLAMELLENENDE	380
TABELLE 10-38: KERBFALLVORSCHLAG STIRNPLATTENVERBINDUNG MIT VORGESPANNTEN SCHRAUBEN IN TABELLE 8.5.....	381
TABELLE 10-39: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 1.....	382
TABELLE 10-40: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 3.....	382
TABELLE 10-41: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 4.....	383
TABELLE 10-42: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 5.....	383
TABELLE 10-43: KERBFALLEMPFEHLUNG FÜR DETAIL 9.....	384
TABELLE 10-44: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 1	385
TABELLE 10-45: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 2	386
TABELLE 10-46: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 3	387
TABELLE 10-47: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 4	388
TABELLE 10-48: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 1	389
TABELLE 10-49: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 2	389
TABELLE 10-50: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 3	390
TABELLE 10-51: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 4	390
TABELLE 10-52: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 5	391
TABELLE 10-53: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 6	391
TABELLE 10-54: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 7	392
TABELLE 10-55: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 8	392
TABELLE 10-56: KERBFALLEMPFEHLUNG DETAIL 1 UND NEUES DETAIL 3.....	393

TABELLE 10-57: KERBFALLEMPFEHLUNG TABELLE 8.10.....	394
TABELLE 23-1: VERSAGENSKRITERIEN.....	463
TABELLE 23-2: ZU DOKUMENTIERENDE INFORMATIONEN EINER ERMÜDUNGSVERSUCHSSERIE	464
TABELLE 25-1: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN BLECHE.....	479
TABELLE 25-2: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER VERWENDETEN BLECHE - ANGABEN IN %	479
TABELLE 25-3: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN TRÄGER	480
TABELLE 25-4: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER VERWENDETEN TRÄGER - ANGABEN IN %	480
TABELLE 25-5: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN SCHRAUBEN	480
TABELLE 25-6: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER VERWENDETEN SCHRAUBEN - ANGABEN IN %	480
TABELLE 25-7: FERTIGUNGSINFORMATIONEN GROßPROBEKÖRPER.....	481
TABELLE 25-8: FERTIGUNGSINFORMATIONEN KLEINPROBEKÖRPER.....	482
TABELLE 25-9: CHARAKTERISTISCHE SCHWEIßNAHTGEOMETRIEN UND ABWEICHUNG ZU NOMINELLEN WERTEN	482
TABELLE 26-1: PARAMETER BESCHREIBUNG.....	488

Abkürzungsverzeichnis

Abbreviations and symbols

Abkürzung	Bedeutung
Abw. zu EC	Abweichung zu Eurocode
A_D	Querschnittsfläche Druckkörper
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
A_s	Querschnittsfläche Schraube
C3D20R	Volumenelemente mit quadratischem Verschiebungsansatz und reduzierte Integration
C3D8	Volumenelemente mit linearem Verschiebungsansatz ohne reduzierte Integration
C3D8R	Volumenelemente mit linearem Verschiebungsansatz und reduzierter Integration
CAFL	constant amplitude fatigue life
CAKP	Constant amplitude knee point
C_D	Steifigkeit des Druckkörpers
C_s	Steifigkeit der Schraube
CSS	Cascading Style Sheets
D	totale Schädigung
DAST	Deutscher Ausschuss für Stahlbau
DBMS	Datenbankmanagementsystem
D_m	effektive Miner Summe
DMS	Dehnungsmessstreifen
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
E	Elastizitätsmodul
EC	Eurocode
ECCS TC6	European Convention for Constructional Steelwork - Technical Committee 6
EKS	Europäische Konvention für Stahlbau
f	Prüffrequenz
f(R)	Modifikationsfaktor für Spannungsverhältnisse $R < 0,5$
f(t)	Dickenreduzierungsfaktor
f.l.t.r.	from left to right
f.t.l.t.b.r.	from top left to bottom right
F_0	Zentrifugalkraft
FAT	Fatigue class
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Element-Methode
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
F_{max}	maximale Zugkraft
F_{min}	minimale Zugkraft
FOSTA	Forschungsvereinigung Stahlanwendung
F_s	Schraubenkraft
F_v	Vorspannkraft Schraube
HCF	high cycle fatigue, Dauerfestigkeitsbereich
HTML	HyperText Markup Language
IABMAS	International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
IIW	International Institut of Welding
K_B	Federsteifigkeit für Drehfeder (Zugblech Stirnplatte)
K_f	Spannungskonzentrationsfaktor
k_{HS}	Strukturformzahl

k_k	Kerbwirkungszahl, Kerbformzahl
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
k_n	Faktor für die Ermittlung charakteristischer Werte
k_s	Abminderungsfaktor für die Größenabhängigkeit
K_S	Federsteifigkeit für Drehfeder (Biegesteifigkeit Schraube)
L	Abstand der Schweißnahtübergänge
LFC	low cycle fatigue, Kurzzeitfestigkeit
$\log a$	theoretischer Schnittpunkt der Zeitfestigkeitsgerade mit der Abszisse
$\log N$	logarithmierte Anzahl der Lastspiele
$\log S$	logarithmierter Wert der Spannungsschwingbreite
m	inverse Steigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich
m_0	Masse des Umwuchtreglers
MAG	Metallaktivgasschweißen
M_S	Schraubenmoment
N	Zyklus, Lastspiel
n	Stichprobenanzahl
PD	Überkopfposition
PHP	Personal Home Page Tools
$P_{\bar{u}}, P_s$	Überlebenswahrscheinlichkeit
R	Spannungsverhältnis
r	Kerbradius
R	Randkraft
r	Radius
r	Korrelationskoeffizient
r^*	Ersatzmikrostrukturlänge
r_{ref}	Referenzradius
s	Standardabweichung
S	Spannungsschwingbreite
s_m	Spannungsverlaufparameter
SQL	Structured Query Language
t	Dicke
TC	Technische Kommission
t_{eff}	effektive Dicke
t_{ref}	Referenzdicke
t_s	Dicke Stirnplatte
UP	Unterpulverschweißen
v.l.n.r.	von links nach rechts
v.l.o.n.r.u.	von links oben nach rechts unten
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
$V_{Schraube}$	Vorspannkraft Schraube
WEA	Windenergieanlagen
WIG	Wolfram inertgasschweißen
zul. $\Delta\sigma_c$	zulässige Spannungsschwingbreite
γ_{Ff}	Sicherheitsfaktor für die schadensäquivalenten Spannungsschwingbreiten
γ_M	Sicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite
γ_P	Teilsicherheitsbeiwert
Δb_D	Stauchung des Druckkörpers
Δl_S	Verlängerung der Schraube
ΔZ	äußere zentrische Zugbeanspruchung
ΔZ_D	Druckspannung im Druckkörper

ΔZ_S	Zugspannung in der Schraube
$\Delta \sigma$	Längsspannungsschwingbreite
$\Delta \sigma_a$	Spannungsamplitude
$\Delta \sigma_c$	Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit - Nennspannungen
$\Delta \sigma_{c,50\%}$	charakteristischer Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit
$\Delta \sigma_D$	Dauerfestigkeit
$\Delta \sigma_{E,2}$	Bemessungswert der Nennspannungsschwingbreite
$\Delta \sigma_L$	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit - Normalspannungen
$\Delta \sigma_{RD}$	Grenzwert der zulässigen Schwingbreite
$\Delta \sigma_{SM}$	Spannungsschwingbreite in der Schraubenmitte
$\Delta \sigma_{\bar{U}}$	Spannungsschwingbreite am Schweißnahtübergang
$\Delta \sigma_W$	Spannungsschwingbreite an der Schweißnahtwurzel
$\Delta \tau$	Schubspannungsschwingbreite
$\Delta \tau_c$	Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit - Schubspannungen
$\Delta \tau_L$	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit - Schubspannungen
κ	Spannungsverhältnis (betragsmäßige Minimal- und Maximalspannungen)
λ_i	Schadenäquivalenzfaktoren
σ_a	Spannungsamplitude
σ_{HS}	Strukturspannung (Structural hot spot stress)
σ_k	Kerbspannung
σ_m	Mittelspannung
σ_{nenn}	Nennspannung
$\sigma_{nenn,mod}$	korrigierte Nennspannungen
σ_o	größere Spannung "Oberspannung"
σ_u	kleinere Spannung "Unterspannung"
σ_{wf}	Längsspannung in Schweißnaht quer zur Nahtachse
τ_{wf}	Schubspannung in Schweißnaht längs der Nahtachse
ϕ_i	dynamischer Beiwert
ϕ_s	Verdrehung
ω_s	Durchbiegung

1 Einleitung

Introduction

Kurzfassung

Stahlkonstruktionen unterliegen zyklischen Beanspruchungen, die den Nachweis gegen Ermüdung erfordern. Im Vergleich zu früheren deutschen Normen oder Regelwerken anderer Bereiche führt der Kerbfallkatalog nach EN 1993-1-9 [1] in vielen Fällen zu konservativeren Ergebnissen. Die Basis des Kerbfallkatalogs stammt aus 1989 und älter und die Versuchsdaten wurden damals nach Verfahren ausgewertet, die nicht mehr dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Das hier präsentierte Forschungsvorhaben zielt auf die Erarbeitung von Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Kerbfallkataloges in DIN EN 1993-1-9 [1] ab. Dabei soll die Versuchsgrundlage kritisch hinterfragt und mit modernen statistischen Verfahren Neubewertet werden, sowie um aktuelle Forschungsergebnisse und -versuche erweitert werden.

Abstract

Steel structures are subject to cyclic loads which require verification against fatigue. In comparison to earlier German standards or codes in other areas, the detail catalogue according to DIN EN 1993-1-9 [1] in many cases leads to more conservative results. The basis of the detail catalogue dates back to 1989 and older and the test data were then evaluated according to procedures which no longer correspond to the current state of the art. The research project presented here aimed to the development of recommendations for the further development of the detail catalogue in DIN EN 1993-1-9 [1]. The experimental basis is to be critically questioned and re-evaluated using modern statistical methods as well as to be expanded to include current research results and experiments.

1.1 Problemstellung

Problem definition

In vielen Bereichen unserer Infrastruktur, wie z. B. im Brückenbau, im Kran- bzw. Kranbahnbau und auch im Hochbau oder Schornstein- und Mastbau, unterliegen Stahlkonstruktionen zyklischen Beanspruchungen, die den Nachweis gegen Ermüdung erfordern. Eine große Bedeutung kommt bei der Auslegung solcher hochbeanspruchter Konstruktionen im Bauwesen dem Kerbfallkatalog in DIN EN 1993-1-9 (Eurocode 3 Teil 1-9) [1] zu, der die Ermüdungsfestigkeit spezifischer Konstruktionsdetails regelt. Eigentlich sollen Normen zu sicheren Nachweisen führen, dabei jedoch nicht überkonservativ sein, um im Sinne der Ressourcenschonung auch eine wirtschaftliche Dimensionierung zu ermöglichen. Tatsächlich kann man zeigen, dass im Vergleich zu früheren deutschen Normen oder Regelwerken anderer Bereiche der Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 [1] in vielen Fällen zu konservativeren, d.h. wirtschaftlich ungünstigeren, Ergebnissen führt.

Die Grundlage des aktuellen Kerbfallkatalogs ist intransparent. So ist für viele Konstruktionsdetails die Grundlage ihrer Kerbfalleinstufung unklar. Auch die hinter der Auswertung

experimenteller Versuchsdaten stehende Methode der statistischen Auswertung ist teilweise inkonsistent. Die Verbindung zu Anforderungen an die statistische Auswertung nach Eurocode 0 [3] ist nicht geklärt.

1.2 Motivation

Motivation

Um die aktuelle Stahlbau-Praxis, den technischen Fortschritt und neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen, bedarf der Kerbfallkatalog unbedingt einer kritischen Überprüfung und einer Aktualisierung, die sich an neuen Bewertungsmethoden orientiert. Dies ist eine für die zukünftige Entwicklung sehr wichtige und umfangreiche Grundlagenarbeit.

Deswegen zielen die im Rahmen dieses Forschungsprojekts beschriebenen Untersuchungen vornehmlich darauf ab, bestehende Versuchsdaten zusammen mit neuen Versuchsdaten neu statistisch auszuwerten, um Empfehlungen für verbesserte Kerbfallklassen für die europäische Normung zu erarbeiten. Es wurde dabei eine detaillierte Datenbankstruktur entwickelt, um die umfangreichen Ermüdungsversuchsdaten geordnet zu erfassen und intelligent auswerten zu können. Die experimentellen Untersuchungen in der Datenbank stammen aus Veröffentlichungen, die im Rahmen des Projekts systematisch ausgewertet wurden. Für die Herleitung von Kerbfällen wurden dabei ausschließlich Primärquellen genutzt.

Mithilfe einer einheitlichen statistischen Auswertmethode, die für die Bewertung großer Streufelder geeignet ist und die konform zu den Anforderungen in Eurocode 0 [3] ist, können experimentell fundierte Ermüdungsfestigkeitswerte für eine Vielzahl von Konstruktionsdetails abgeleitet werden.

1.3 Zielsetzung

Objective

Vor dem Hintergrund der zuvor beschriebenen unbefriedigenden Situation hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Sicherheit von ermüdungsbeanspruchten Stahlkonstruktionen und der Möglichkeit ihrer zukunftsfähigen Auslegung ist das übergeordnete Ziel des hier beschriebenen Projektes die Erarbeitung von Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Kerbfallkataloges in DIN EN 1993-1-9 [1] bezogen auf Konstruktionsdetails des Stahl- und Verbundbrückenbaus, Kran- und Kranbahnbaus sowie des Mast- und Schornsteinbaus. Die Konzentration lag dabei auf den klassischen Kerbfällen der Tabellen 8.1 bis 8.5, die nicht geschweißte Bauteile, Längsnähte, Quernähte, angeschweißte Steifen und geschweißte Stöße umfassen. Weiterhin wurden zudem Details der Tabellen 8.6 bis 8.10, die sich mit Hohlprofilen, Hohlprofilknoten, Details an orthotropen Platten und Obergurt-Stegblechanschlüssen von Kranbahnträgern befassen, untersucht.

Dabei werden die Ermüdungsversuchsdatengrundlage des vorhandenen Kerbfallkatalogs nach EN 1993-1-9 [1] in für die Praxis wesentlichen Bereichen kritisch hinterfragt, mit modernen statistischen Verfahren neubewertet, sowie um aktuelle Forschungsergebnisse bzw. -versuche erweitert. Hierzu werden statistische Auswertemethoden evaluiert, dabei kommt ferner eine moderne Datenbankstruktur zur Anwendung.

Des Weiteren stellt die Ergänzung des Kerbfallkatalogs um fehlende bzw. nicht hinreichend klassifizierte Details ein weiteres Ziel dar. Dies betrifft das Gurtlamellenende und den Stirnplattenstoß von I-Profilträgern mit vorgespannten Schrauben.

1.4 Methodische Vorgehensweise

Methodological approach

In einem ersten Schritt wird eine einheitliche statistische Auswertungsmethode entwickelt, die für alle Untersuchungen des Projektes angewandt wird. Als Grundlage für die Sammlung von Ermüdungsversuchsdaten wird ein Datenbanksystem mit webbasierter Anwendung entwickelt, das Speicher-, Such- und Selektionshierarchien beinhaltet. Die Datenbank basiert primär auf Originalquellen. So werden die Versuchsdaten des Hintergrunddokuments zur EN 1993-1-9 [1, 4] aus den Originalveröffentlichung der dort aufgeführten Quellen entnommen.

Zusätzlich werden bisher nicht aufgeführte, neuere und eigene Versuchsdaten der drei Forschungsstellen mit aufgenommen. Die Quellen werden ausführlich aufgearbeitet und die Versuchsdaten, sowie alle Informationen, welche für das Ermüdungsverhalten der Details relevant sein können, in die Datenbank aufgenommen.

Anhand verschiedener Filterkriterien werden die Versuchsdaten kritisch selektiert. Für jedes Detail erfolgt eine Analyse hinsichtlich Versagensmechanismus und Einflussparametern auf die Ermüdungsfestigkeit. Schließlich wird jedes Detail neu ausgewertet, wobei Vorschläge für realistischere Kerbfalltabellen entwickelt werden. Dabei werden ebenfalls wichtige Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit, wie der Maßstabseffekt, Mittelspannungs-, Bauteil- und Streckgrenzeinfluss sowie Fertigungseinflüsse untersucht.

Ferner werden Ermüdungsversuche zu den im Kerbfallkatalog bisher unzureichend klassifizierten Kerbdetails „Gurtlamellenende“ sowie „Stirnplattenstoß von I-Profilträgern“ durchgeführt und neue Kerbfallempfehlungen abgeleitet.

2 Stand der Technik

State of the art

Kurzfassung

Voraussetzung für die Neubewertung von Kerbfallklassen ist die Kenntnis des aktuellen Stands der Normung beim Ermüdungsnachweis. Hierzu müssen zunächst die Grundlagen der Ermüdung betrachtet werden, um die Basis für die folgenden Untersuchungen zu definieren. Darauf aufbauend informieren der Hintergrund und die Nachweisführung der DIN EN 1993-1-9 [1] über den Ursprung und die Handhabung der aktuellen Kerbdetails im Kerbfallkatalog zusammen mit globalen und lokalen Bemessungsansätzen. Diese können darüber hinaus mit Details in an den Stahlbau angrenzenden Bereichen verglichen werden. Schließlich werden Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit beschrieben, die in nachfolgenden Abschnitten des Berichtes anhand von Versuchsdaten tiefergehend analysiert werden.

Abstract

A prerequisite for the fatigue analysis is the knowledge of the current state of the art in the fatigue analysis of detail classes. For this purpose, the basic principles of fatigue are first regarded in order to define the basis for the following investigations. Building on this, the background and the verification procedure of DIN EN 1993-1-9 [1] provide information on the origin and use of the current fatigue details in the detail catalogue with global and local design approaches. These can also be compared with details in areas adjacent to steel construction. Finally, influences on fatigue strength are described, which are analysed in detail in subsequent sections of the report based on test data.

2.1 Allgemeines

General

In vielen Bereichen unserer Infrastruktur, wie z. B. im Brückenbau, im Kran- bzw. Kranbahnbau und auch im Hochbau oder Schornstein- und Mastbau unterliegen Stahlkonstruktionen zyklischen Beanspruchungen, die den Nachweis gegen Ermüdung erfordern. Die nachfolgenden Abschnitte thematisieren sowohl die Grundlagen der Ermüdung, den Stand der Normung beim Ermüdungsnachweis, als auch die Einflussfaktoren für ein Versagen durch Ermüdung.

2.2 Grundlagen der Ermüdung

Basics of fatigue

Der Begriff der Ermüdung beschreibt den Prozess der Rissbildung und des Rissfortschritts in einem Bauteil, das wiederholten Spannungsschwankungen ausgesetzt ist. Die Ermüdung metallischer Werkstoffe infolge veränderlicher, schwingender Beanspruchung basiert auf mikro- und makrostrukturellen Änderungen des Werkstoffgefüges, ausgelöst durch wechselnde plastische Verformungen. Ermüdungsrisse können infolge lokaler

Spannungsspitzen an äußeren, konstruktiven, Werkstoff- oder Belastungskernen entstehen [5]. Um eine Ermüdungsbelastung beschreiben zu können, müssen zunächst die Begriffe einer zeitlich veränderlichen Belastung eingeführt werden. Bild 2-1 zeigt die Definitionen zur Beschreibung einer zyklischen Beanspruchung.

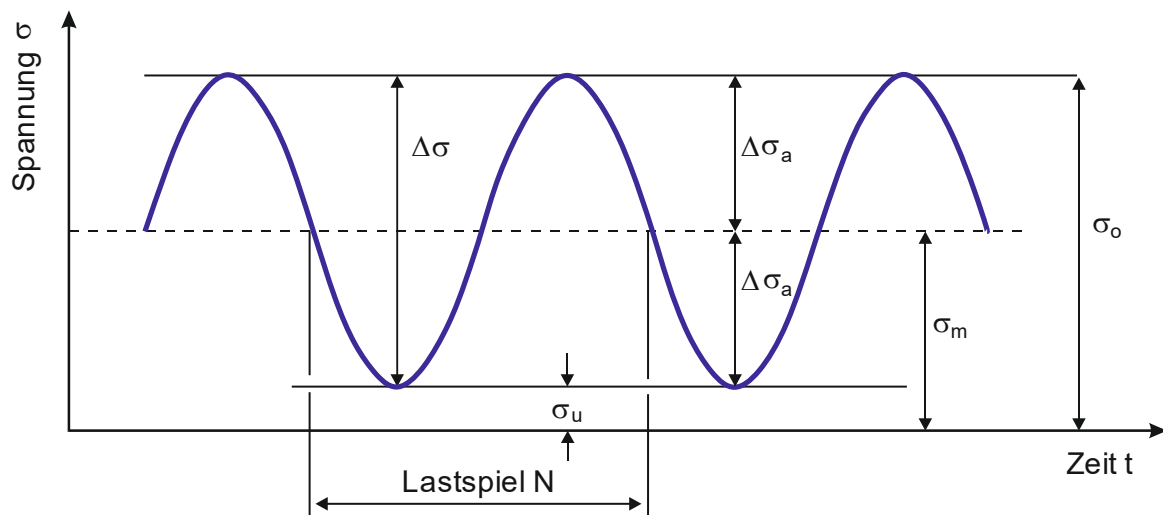


Bild 2-1: Zyklischer Beanspruchungsverlauf

Figure 2-1: Cyclic loading pattern

Dabei bezeichnet

σ_u die kleinere Spannung: „Unterspannung“,

σ_o die größere Spannung: „Oberspannung“,

σ_m die „Mittelspannung“,

$\Delta\sigma_a$ die „Spannungsamplitude“,

$\Delta\sigma$ die „Spannungsschwingbreite“ oder „Spannungsdoppelamplitude“ und

N einen „Zyklus“ oder ein „Lastspiel“.

Es gelten die folgenden Relationen:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2} \quad (2-1)$$

$$\Delta\sigma_a = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{2} \quad (2-2)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u = 2 \cdot \Delta\sigma_a \quad (2-3)$$

Weiterhin dient das Spannungsverhältnis R (bzw. κ) zur Beschreibung der Lage einer Belastung im Zug- bzw. Druckbereich:

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \text{ bzw. } \kappa = \frac{\pm|\sigma_u|}{\pm|\sigma_o|} \quad (2-4)$$

Dabei werden die Ober- und Unterspannungen mit Vorzeichen eingesetzt: Zugspannungen besitzen ein positives, Druckspannungen ein negatives Vorzeichen. Bei der Definition von κ werden Ober- und Unterspannung als *betragsmäßige* Maximal- und Minimalspannungen gewählt, aber mit Vorzeichen eingesetzt. Folglich kann R Werte zwischen $-\infty$ und $+\infty$ und κ Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei folgende Bezeichnungen verwendet werden, siehe Tabelle 2-1. Für weitere Informationen siehe auch Abschnitt 2.4.1

Tabelle 2-1: Spannungsverhältnis R in Abhängigkeit der Beanspruchungsart

Table 2-1: Stress ratio R depending on type of loading

Beanspruchungsart	Spannungsverhältnis	
Zugschwellbeanspruchung	$0 < R < 1$	$0 < \kappa < 1$
Zugursprungsbeanspruchung	$R = 0$	$\kappa = 0$
Reine Wechselbeanspruchung	$R = -1$	$\kappa = -1$
Druckursprungsbeanspruchung	$R = \infty$	$\kappa = 0$
Druckschwellbeanspruchung	$1 < R < \infty$	$0 < \kappa < 1$

Die Ermüdungsfestigkeit eines Konstruktionsdetails kann über eine „Ermüdungsfestigkeitskurve“ oder „Wöhlerlinie“ beschrieben werden, die eine quantitative Beziehung zwischen der Spannungsschwingbreite und der Anzahl der Spannungsspiele, die zum Versagen führen, herstellt [1]. Die Wöhlerlinie wird durch die Durchführung von „Wöhlerversuchen“ ermittelt. Ein Probekörper wird dabei einer konstanten Spannungsschwingbreite ausgesetzt, bis die „Lebensdauer“ erreicht ist und das Versagen eintritt. Versagt ein Probekörper nach einer gewissen Anzahl an Schwingspielen nicht, wird er als „Durchläufer“ bezeichnet.

Führt man Ermüdungsversuche mit verschiedenen Spannungsschwingbreiten an einer Anzahl gleichartiger Probekörper durch, so lässt sich die Relation zwischen Spannungsschwingbreite und Lebensdauer erkennen, siehe Bild 2-2.

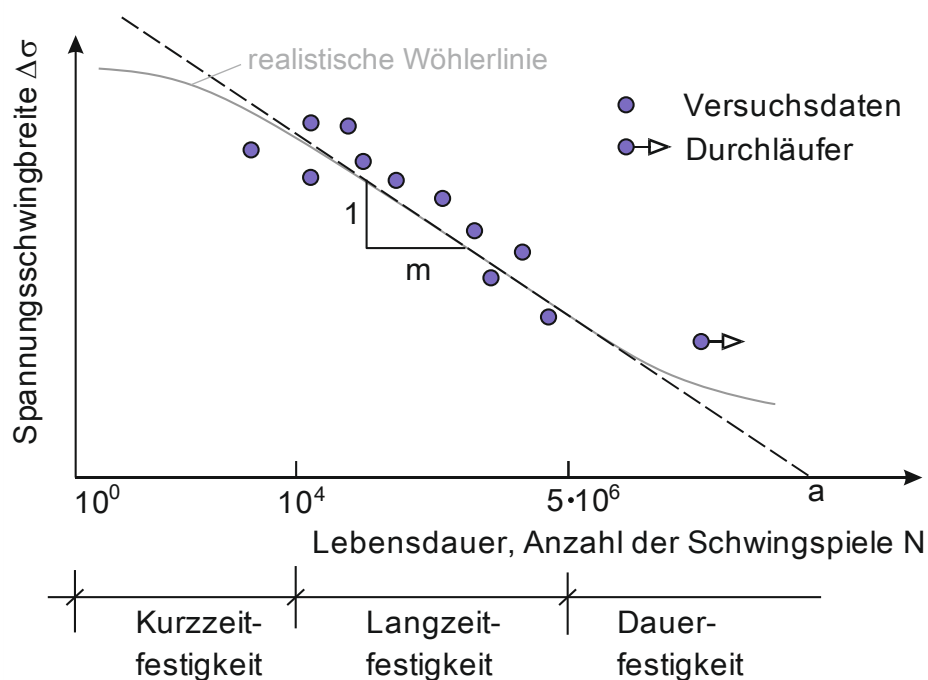


Bild 2-2: Ermüdungsfestigkeitskurve

Figure 2-2: Fatigue strength curve

Der Bereich unterhalb der Lebensdauer von 10^4 Lastspielen wird als Kurzzeitfestigkeit (low cycle fatigue – LCF) bezeichnet, wo durch plastisches Fließen zum Teil ein vorzeitiges Versagen herbeigeführt wird. Der Kurzzeitfestigkeitsbereich ist für den klassischen Bereich der Materialermüdung nicht von Bedeutung und wird in den hier beschriebenen Untersuchungen nicht weiter betrachtet. Der Zeitfestigkeitsbereich befindet sich zwischen

10^4 und 10^6 bis 10^7 Lastspielen und stellt im doppeltlogarithmischen Maßstab eine fallende Gerade mit der inversen Steigung m dar. Ab 10^6 bis 10^7 Lastspielen spricht man vom Dauerfestigkeitsbereich (high cycle fatigue – HCF), wo in der Theorie bei Beanspruchungen mit konstanten Spannungsschwingbreiten kein Versagen eintritt.

Die Wöhlerlinie dient der Berechnung des Widerstandswertes beim Ermüdungsnachweis, der im nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben wird.

2.3 Stand der Normung beim Ermüdungsnachweis

State of the art in fatigue verification

2.3.1 Übersicht

Overview

Eine große Bedeutung bei der Auslegung ermüdungsbeanspruchter Konstruktionen kommt im europäischen Raum dem Kerbfallkatalog in DIN EN 1993-1-9 [1] zu, der die Ermüdungsfestigkeit spezifischer Konstruktionsdetails im Stahlbau regelt. Ähnliche Nachweiskonzepte existieren sowohl international als auch in an den Stahlbau angrenzenden Bereichen, wie beispielsweise im Maschinen- oder Kranbau.

Diese Normen für die übliche Ermüdungsbemessung beruhen im Allgemeinen auf dem vereinfachten Nennspannungskonzept. Im Vergleich zu diesem globalen Ansatz existieren lokale Nachweisverfahren, die auch im Rahmen des aktuellen Projektes angewandt wurden. Diese verschiedenen Aspekte werden im Weiteren zur Erläuterung des Stands der Normung beim Ermüdungsnachweis näher betrachtet.

2.3.2 Hintergrund und Nachweisführung der DIN EN 1993-1-9

Background and verification procedure acc. to DIN EN 1993-1-9

Die DIN EN 1993-1-9 [1] bildet die Grundlage der Nachweisführung von ermüdungsbeanspruchten Stahlbauteilen in Deutschland und Europa. Dabei spielt der Kerbfallkatalog, der im Zentrum der Bearbeitung dieses Projektes steht, eine entscheidende Rolle. Folglich werden Hintergrund und Nachweiskonzept der DIN EN 1993-1-9 [1] in diesem Abschnitt ausführlich behandelt.

2.3.2.1 Hintergrund

Background

Das Eurocode-Programm wurde von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften entwickelt, um Handelshemmnisse zu beseitigen und technische Normen zu harmonisieren [1]. Der Inhalt der jetzigen Eurocode Norm zur Ermüdungsbemessung DIN EN 1993-1-9 [1] basiert im Allgemeinen auf der Vornorm ENV 1993-1-1 [6], in der der heutige Teil 1-9 noch ein Unterkapitel darstellte. Bei der Entwicklung von DIN EN 1993-1-9 [1] wurden vom Project Team zur Übertragung der Vornorm ENV 1993-1-1 [6] in die Norm EN 1993 Verbesserungen der Vornorm ENV 1993-1-1 [6] eingearbeitet. Dabei sollten vorhandene Kerbfallkategorien auch anhand von Auswertungen neuerer Versuche überprüft, neue Kerbfälle integriert, Blechdickenabhängigkeiten einbezogen, sowie die generelle Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Ermüdung berücksichtigt werden [7].

Die Vornorm ENV 1993-1-1 [6] basiert ferner auf einer Veröffentlichung der EKS-Empfehlungen für Ermüdungsnachweise aus dem Jahr 1985 [8], die im Rahmen des Technischen

Komitees TC 6, der Europäischen Konvention für Stahlbau, von den führenden europäischen Experten im Bereich der Ermüdung verfasst wurde. Die genaue historische Entwicklung jedes einzelnen Details ist nicht explizit bekannt, kann aber in einigen Fällen anhand verschiedener Publikationen rekonstruiert werden. Außerdem lässt sich beim Normenvergleich feststellen, dass sich die Details verschiedener Regelungen ähnlich entwickelt haben, siehe hierzu Abschnitt 2.3.3.

Des Weiteren ist im Hintergrunddokument zur DIN EN 1993-1-9 [1, 4], das auf einem älteren Kommentar zur Vornorm [9] basiert, eine Datenbank von Ermüdungsversuchsreihen enthalten. Diese wurde aus 13 Datensammlungen internationaler Autoren erstellt und gilt als Hintergrund des heutigen Kerbfallkataloges [4]. Im Rahmen des hier beschriebenen Projektes wurde die gesamte Datensammlung recherchiert und im Rahmen einer interaktiven Datenbank (siehe Abschnitt 4) aufgearbeitet, wie in Abschnitt 6 beschrieben ist.

2.3.2.2 Bemessungskonzept

Assessment method

DIN EN 1993-1-9 [1] beinhaltet ein Nachweiskonzept zur Bemessung ermüdungsbeanspruchter Bauteile, Verbindungen und Anschlüssen. Dabei erfolgt der Nachweis mithilfe von auf Versuchen basierten Ermüdungsfestigkeitskurven nach dem „Nennspannungskonzept“. Die „Nennspannung“ wird als die Spannung im Bauteil bezeichnet, die unmittelbar an der erwarteten Rissstelle liegt und nach der elastischen Spannungstheorie ohne Berücksichtigung der örtlichen Kerbwirkung berechnet wird [1].

In der Norm werden zwei verschiedene „Bemessungskonzepte“ aufgeführt. Es kann zwischen dem Konzept der „Schadenstoleranz“ und der „ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung“ unterschieden werden [1].

Ersteres wird angewendet, wenn durch planmäßige Inspektionen und Wartung während der Nutzungsdauer des Tragwerks eventuelle Ermüdungsschäden erkannt und beseitigt werden können oder wenn bei Auftreten von Ermüdungsrissen Lastumlagerungen im tragenden Querschnitt oder zwischen Bauteilen möglich sind. Das Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung sollte dann zur Anwendung kommen, wenn Risse zu einem unangekündigten Versagen des Bauteils führen können. Je nach Bemessungskonzept und Schadensfolgen werden unterschiedliche Sicherheitsfaktoren für die Ermüdungsfestigkeit empfohlen, siehe Tabelle 2-2 [1].

Tabelle 2-2: Empfehlungen für γ_{MF} -Faktoren für die Ermüdungsfestigkeit

Table 2-2: Recommendations for γ_{MF} -factors for fatigue strength

Bemessungskonzept	Schadensfolgen	
	Niedrig	Hoch
Schadenstoleranz	1,00	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung	1,15	1,35

Der Anwendungsbereich der Norm beschränkt sich auf Werkstoffe, die den Anforderungen nach EN 1993-1-10 [10] genügen und Bauteile, die nach EN 1090 [3] ausgeführt werden. Die Festigkeiten gelten für Konstruktionen unter normalen atmosphärischen Bedingungen und Temperaturen und ausreichendem Korrosionsschutz. Zudem werden Nachbehandlungsmethoden nicht thematisiert [1]. Versagen im Bereich der Kurzzeitfestigkeit, siehe Bild 2-2 wird ebenfalls nicht behandelt.

2.3.2.3 Ermittlung der Spannungsschwingbreiten

Calculation of stress ranges

Die Berechnung der einwirkenden Spannungsschwingbreiten erfolgt auf Gebrauchsniveau. Dabei wird die Nennspannung an der Stelle der erwarteten Rissentstehung bestimmt. Die Norm unterscheidet dabei nach Längsspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma$ und Schubspannungsschwingbreiten $\Delta\tau$. Spannungen in Schweißnähten werden nach Längsspannungen σ_{wf} quer zur Nahtachse und Schubspannungen τ_{wf} längs der Nahtachse definiert, für welche getrennte Nachweise zu führen sind.

In der Regel erfolgt der Nachweis über Nennspannungen. Die Bestimmung der Nennspannung wird im Folgenden für Längsspannungen aufgeführt, gilt jedoch ebenso für Schubspannungen. Der Bemessungswert der Nennspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{E,2}$ lässt sich wie folgt bestimmen [1]:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_k) \quad (2-5)$$

mit

γ_{Ff} als Teilsicherheitsbeiwert für die schadensäquivalenten Spannungsschwingbreiten (normalerweise $\gamma_{Ff} = 1,0$),

$\Delta\sigma(\gamma_{Ff} \cdot Q_k)$ als Spannungsschwingbreite aus Ermüdungsbelastung nach EN 1991 [11]

λ_i als Schadensäquivalenzfaktoren, die abhängig von den Beanspruchungen gemäß den Anwendungsteilen von EN 1993 [12] sind z.B. [13]

Bei nicht geregelten Lastbildern können die Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_i$ aus in Spannungszeitverläufen überführte Beanspruchungszyklen bestimmt werden. Mithilfe geeigneter „Zählverfahren“ wie der „Rainflow“- oder der „Reservoir“-Methoden können die Spannungsschwingbreiten sowie deren Anzahl und die Mittelspannung bestimmt werden, und ein Nachweis nach der Schädigungshypothese nach Palmgren-Miner [14, 15] geführt werden.

In einigen Fällen wird ein Nachweis mittels „korrigierter Nennspannungen“ gefordert. Die Spannungsschwingbreite aus Ermüdungsbelastung wird dann zusätzlich mit einem Spannungskonzentrationsfaktor k_f zur Berücksichtigung von lokalen Spannungserhöhungen multipliziert. Spannungskonzentrationsfaktoren können der Literatur entnommen oder über Finite-Elemente (FE) Berechnungen bestimmt werden [1].

Alternativ können lokale Konzepte angewandt werden, auf die in Abschnitt 2.3.4 separat eingegangen wird.

2.3.2.4 Ermüdungsfestigkeit

Fatigue strength

Wie in Abschnitt 2.2 erwähnt, kann die Ermüdungsfestigkeit eines Details über eine Wöhlerlinie beschrieben werden. In DIN EN 1993-1-9 [1] sind 14 Wöhlerlinien für Längs- und zwei Wöhlerlinien für Schubspannungen definiert, siehe Bild 2-3 und Bild 2-4. Jeder Kurve wird eine bestimmte Kerbfallkategorie zugeordnet. Die Distanzen zwischen den einzelnen Ermüdungsfestigkeitskurven ergeben sich aus 20 äquidistanten Abständen der Kurven im logarithmischen Maßstab, sodass der Faktor zwischen den einzelnen Kurven $\sqrt[20]{10} \approx 1,12$ beträgt [4].

Die Kerbfallkategorie einer Kurve entspricht dem „Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit“ $\Delta\sigma_C$ oder $\Delta\tau_C$ in MPa, welcher den Wert der Spannungsschwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen darstellt [1].

Jede erweiterte Wöhlerlinie für Längsspannungsschwingbreiten besitzt folgende definierte Punkte:

- Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ bei $N_C = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen
- Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ (constant amplitude fatigue life - CAFL) bei $N_D = 5 \cdot 10^6$ Schwingspielen
- Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit (cut-off limit) $\Delta\sigma_L$ bei $N_L = 10^8$ Schwingspielen

Für einen bekannten Kerbfall, der den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ angibt, kann die Dauerfestigkeit im doppelt-logarithmischen Rahmen folgendermaßen bestimmt werden [1]:

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{N_C}{N_D}\right)^{1/m} \cdot \Delta\sigma_C = \left(\frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta\sigma_C \approx 0,737 \cdot \Delta\sigma_C \quad (2-6)$$

Hierbei stellt m die inverse Steigung der Wöhlerlinie dar, die in DIN EN 1993-1-9 [1] bei Längsspannungsschwingbreiten auf den Wert $m = 3$ festgelegt ist, wenn nichts anderes angegeben wird. Bei Fachwerkknoten aus Hohlprofilen weist die inverse Steigung den Wert $m = 5$ auf [1].

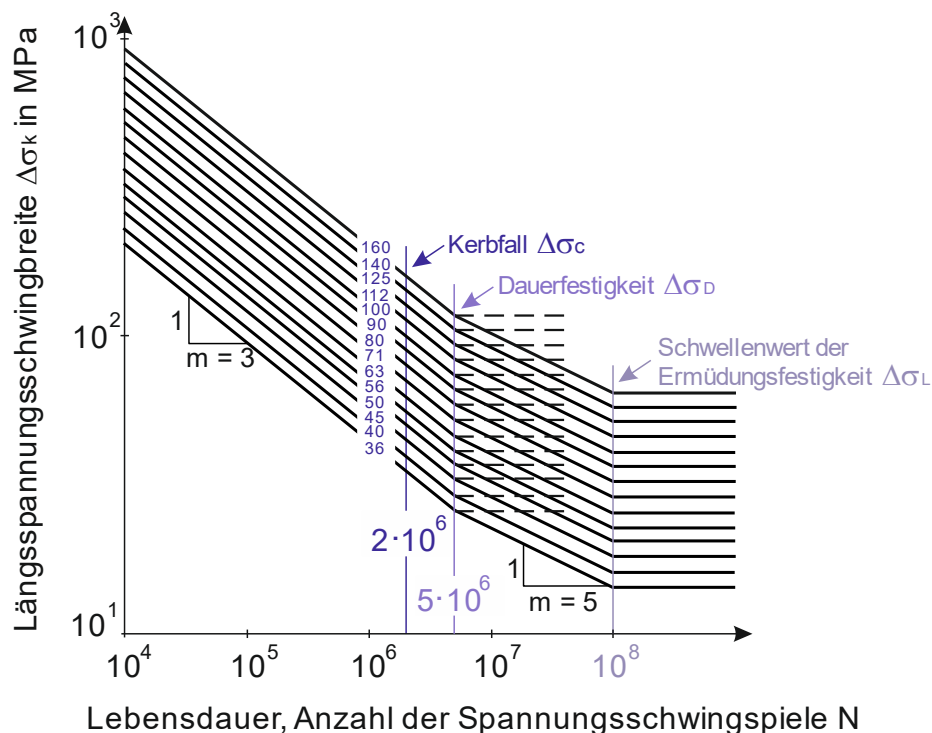


Bild 2-3: Ermüdungsfestigkeitskurven für Längsspannungsschwingbreiten nach DIN EN 1993-1-9

Figure 2-3: Fatigue strength curves for direct stress ranges according to DIN EN 1993-1-9

Wenn die Einwirkung keine Spannungsschwingbreiten oberhalb der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ beinhaltet, besitzt die Wöhlerlinie ab $N_D = 5 \cdot 10^6$ Schwingspielen eine konstante Steigung, wie anhand der gestrichelten Linien in Bild 2-3 zu erkennen ist. Bei Spannungsspektren mit Spannungsschwingbreiten oberhalb und unterhalb der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ sind die erweiterten Wöhlerlinien anzuwenden, die einen weiteren Knickpunkt beim

Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit besitzen. Ausgehend von der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ (2-6) kann der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit folgendermaßen bestimmt werden [1]:

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{N_D}{N_L}\right)^{1/m} \cdot \Delta\sigma_D = \left(\frac{5 \cdot 10^6}{10^8}\right)^{\frac{1}{5}} \cdot \Delta\sigma_D \approx 0,549 \cdot \Delta\sigma_D \quad (2-7)$$

Im Bereich von $N_D = 5 \cdot 10^6$ bis $N_L = 10^8$ Schwingspielen besitzt die Wöhlerlinie eine inverse Steigung von $m = 5$.

Bei den Wöhlerlinien für Schubspannungen wird nicht nach Spannungsschwingbreiten oberhalb oder unterhalb einer Dauerfestigkeit unterschieden, siehe Bild 2-4 [1].

Die Wöhlerlinien für Schubspannungen sind nur durch zwei Punkte charakterisiert [1]:

- Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\tau_C$ bei $N_C = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen
- Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\tau_L$ bei $N_L = 10^8$ Schwingspielen

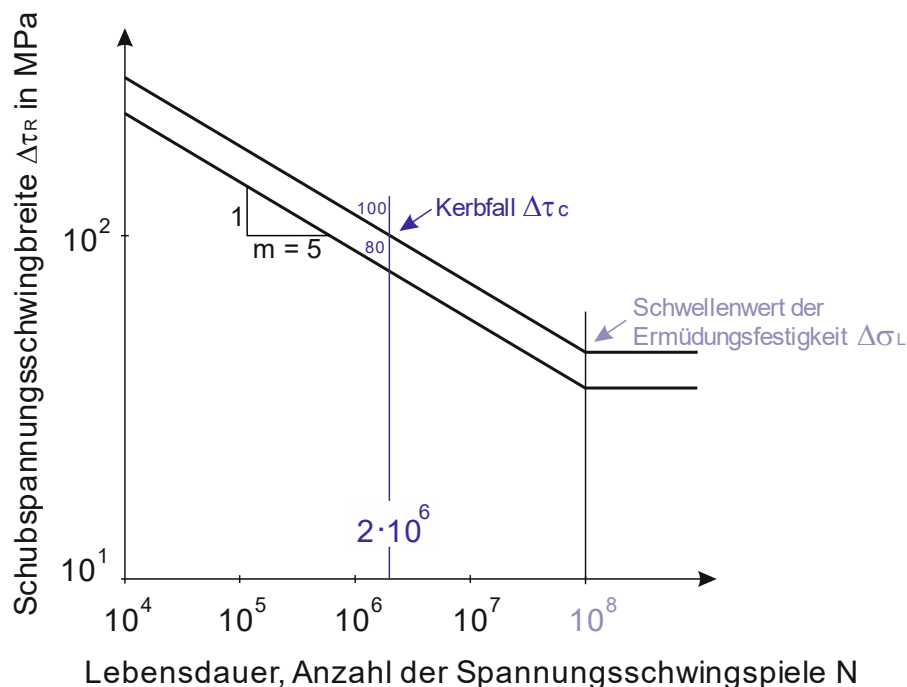


Bild 2-4: Ermüdungsfestigkeitskurven für Schubspannungsschwingbreiten nach DIN EN 1993-1-9

Figure 2-4: Fatigue strength curves for shear stress ranges according to DIN EN 1993-1-9

Für einen bekannten Kerbfall, der nach dem Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\tau_C$ benannt ist, kann der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit im doppelt-logarithmischen Rahmen folgendermaßen bestimmt werden:

$$\Delta\tau_L = \left(\frac{N_C}{N_L}\right)^{1/m} \cdot \Delta\tau_C = \left(\frac{2 \cdot 10^6}{10^8}\right)^{\frac{1}{5}} \cdot \Delta\tau_C \approx 0,457 \cdot \Delta\tau_C \quad (2-8)$$

Einige Kerbfälle sind mit einem Stern gekennzeichnet: $\Delta\sigma_C^*$, siehe Bild 2-5.

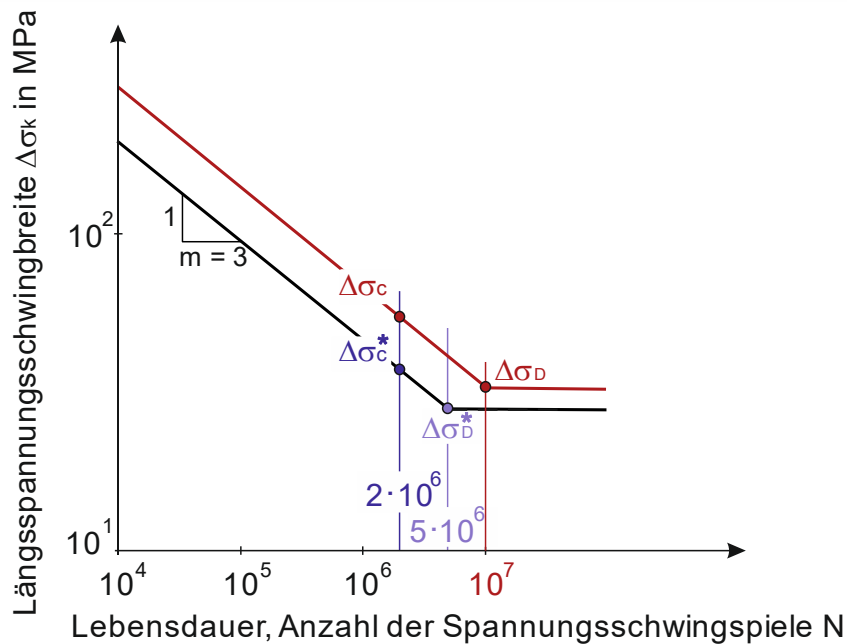


Bild 2-5: Alternative Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ für Kerbfälle, die mit $\Delta\sigma_c^*$ bezeichnet sind nach DIN EN 1993-1-9

Figure 2-5: Alternative strength $\Delta\sigma_c$ for details classified as $\Delta\sigma_c^*$

In diesen Fällen darf der Kerbfall um eine Kategorie angehoben werden, wenn die Wöhlerlinie mit $m = 3$ bis zur Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ bei $N_D = 10^7$ verlängert wird.

Als Hinweis wird in der DIN EN 1993-1-9 [1] ebenfalls die statistische Auswertemethodik, die die Basis der Kerbfallklassifizierungen bildet, beschrieben. Danach stellt der charakteristische Wert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ den Wert dar, welcher für 2 Millionen Spannungsspiele statistisch als 95 %-Quantil für Überleben mit 75 % Vertrauenswahrscheinlichkeit ermittelt worden sei. Somit wird eine Auswertung mittels „Toleranzintervall“ beschrieben, siehe Abschnitt 3. Das Hintergrunddokument zu ebendieser Norm [9] besagt jedoch, dass zur Kerbfallableitung die untere Grenze eines einseitigen Konfidenzintervalls mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95% verwendet worden sei. Dazu wird die Berechnung mittels „Prognoseintervall“, siehe Abschnitt 3 vorgestellt. Folglich kann festgehalten werden, dass in beiden Dokumenten [1, 9] widersprüchlicher Weise unterschiedliche Vorgehensweisen bei der statistischen Auswertemethodik vorgestellt werden.

DIN EN 1993-1-9 [1] gibt des weiteren Hinweise zur Modifizierung der Ermüdungsfestigkeit. Für nicht geschweißte und geschweißte, spannungsarm geglühte Konstruktionen darf ein Mittelspannungseinfluss (siehe auch Abschnitt 2.4.2) angenommen werden. Dieser darf dadurch berücksichtigt werden, dass die einwirkende Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{E,2}$ (2-5) reduziert wird, wenn sie ganz oder teilweise im Druckbereich liegt, siehe Gleichung (2-9). Die reduzierte Spannungsschwingbreite berechnet sich als Summe des Zuganteils der Spannungsschwingbreite und 60 % des Druckanteils.

$$\Delta\sigma = |\sigma_{max}| + 0,6 \cdot |\sigma_{min}| \quad (2-9)$$

Zudem wird für einige Konstruktionsdetails eine Größenabhängigkeit aus Effekten der Blechdicke oder anderer Abmessungen angenommen (siehe auch Abschnitt 2.4.2). Dieser muss durch die Multiplikation des Kerbfalls $\Delta\sigma_c$ mit dem in der Kerbfalltabelle angegebenem Abminderungsfaktor k_s berücksichtigt werden [1].

Die Kerbfallkategorien $\Delta\sigma_C$ und $\Delta\tau_C$ für Nennspannungen sind in Abhängigkeit des Konstruktionsdetails im sogenannten „Kerbfallkatalog“ angegeben, der sich in zehn „Kerbfalltabellen“ gliedern lässt, siehe Tabelle 2-3 [1].

Tabelle 2-3: Tabellen des Kerbfallkatalogs in DIN EN 1993-1-9 [1]

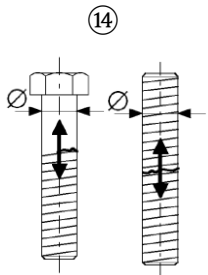
Table 2-3: Tables of the detail catalogue in DIN EN 1993-1-9 [1]

Abschnitt	Konstruktionsdetails
Tabelle 8.1	Ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln
Tabelle 8.2	Geschweißte Querschnitte
Tabelle 8.3	Quer laufende Stumpfnähte
Tabelle 8.4	Angeschweißte Anschlüsse und Steifen
Tabelle 8.5	Geschweißte Stöße
Tabelle 8.6	Hohlprofile
Tabelle 8.7	Geschweißte Knoten von Fachwerkträgern
Tabelle 8.8	Orthotrope Platten mit Hohlrippen
Tabelle 8.9	Orthotrope Platten mit offenen Rippen
Tabelle 8.10	Obergurt-Stegblech Anschlüsse von Kranbahnträgern

Die Kerbfalltabellen bestehen dabei aus den vier Spalten: Kerbfall, Konstruktionsdetail, Beschreibung und Anforderungen. Tabelle 2-4 beinhaltet einen Auszug des Konstruktionsdetails 14 der Tabelle 8.1 des Kerbfallkatalogs.

Tabelle 2-4: Auszug des Kerbfallkatalogs der DIN EN 1993-1-9 - Tabelle 8.1 - Detail 14 [1]

Table 2-4: Extract of the detail catalogue of DIN EN 1993-1-9 - Table 8.1 - Detail 14 [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
50	<p>Größenabhängigkeit für $\phi > 30 \text{ mm}$:</p> $k_s = \left(\frac{30}{\phi}\right)^{0,25}$ 	<p>14) Schrauben und Gewindestangen mit gerolltem oder geschnittenem Gewinde unter Zug.</p> <p>Bei großen Durchmessern (Ankerschrauben) muss der Größeneffekt mit k_s berücksichtigt werden.</p>	<p>14) $\Delta\sigma_C$ ist am Spannungsquerschnitt der Schraube zu ermitteln. Biegung und Zug infolge Abstützkräften sowie weitere Biegespannungen (z. B. sekundäre Biegespannungen) sind zu berücksichtigen.</p> <p>Bei vorgespannten Schrauben darf die reduzierte Spannungsschwingbreite berücksichtigt werden.</p>

In der ersten Spalte „Kerbfall“ ist die Kerbfallklasse in Form von $\Delta\sigma_C$ oder $\Delta\tau_C$ in MPa angegeben. Die zweite Spalte „Konstruktionsdetail“ beinhaltet eine Konstruktionszeichnung des Details mit einer umkreisten Zahl, die das „Detail“ bezeichnet. Die Nummerierung der Details beginnt in jeder Tabelle erneut mit dem Wert 1, sodass ein Detail nur eindeutig bezeichnet ist, wenn die jeweilige Tabelle mitgenannt wird. Die Konstruktionszeichnung beinhaltet außerdem die Andeutung der potenziellen Rissstelle, die zur Bestimmung der Nennspannung benötigt wird. Zudem können in dieser Spalte Angaben zum Größeneffekt gemacht werden. Die dritte Spalte „Beschreibung“ dient zusätzlich zur Zeichnung zur eindeutigen Charakterisierung des Details. In der letzten Spalte können

außerdem „Anforderungen“ enthalten sein, die bei der Bemessung berücksichtigt werden müssen.

2.3.2.5 Ermüdungsnachweis

Fatigue verification

Um den Kurzzeitfestigkeitsbereich zu vermeiden, müssen für den Ermüdungsnachweis nach EN 1993-1-9 [1] alle Spannungen folgendermaßen begrenzt werden:

$$\Delta\sigma \leq 1,5 \cdot f_y \quad \text{bzw.} \quad \Delta\tau \leq \frac{1,5 \cdot f_y}{\sqrt{3}} \quad (2-10)$$

Dabei definiert f_y die Fließgrenze des Stahls.

Folgende Nachweise sind zu führen:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (2-11)$$

Bei gleichzeitiger Wirkung von Längs- und Schubspannungsschwingbreiten sind die Schädigungsanteile zu addieren.

Alternativ zur Nachweisführung über die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite kann der Ermüdungsnachweis auch mittels Schadensakkumulation geführt werden. Die Schadensakkumulation, bei der ein Vergleich der aufgetragenen Schädigung mit der Grenzschädigung durchgeführt wird, erfolgt überwiegend für nicht periodische Beanspruchungen. Nach Palmgren-Miner [14, 15] setzt sich bei der Schadensakkumulation die totale Schädigung D aus der Summe der Teilschädigungen zusammen, die durch jede einzelne Schwingbreite hervorgerufen werden. Die Nachweisführung geschieht wie folgt:

$$D = \frac{n_{E1}}{N_{R1}} + \frac{n_{E2}}{N_{R2}} + \dots + \frac{n_{Ek}}{N_{Rk}} = \sum_{i=1}^k \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq 1,0 \quad (2-12)$$

Hierbei stellt n_{Ei} die Anzahl der Spannungsschwingspiele i mit Spannungsschwingbreite $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i$ dar. N_{Ri} beschreibt die Lebensdauer als Anzahl der Schwingspiele bezogen auf die Bemessungs-Wöhlerlinie $\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} - N_R$ für die Spannungsschwingbreite $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i$.

2.3.3 Vergleich verschiedener Nachweiskonzepte

Comparison of different design methods

Verschiedene andere Normen in an den Stahlbau angrenzenden Bereichen wie dem Kranbau und dem Maschinenbau beinhalten Nachweiskonzepte, die dem der DIN EN 1993-1-9 [1], nachfolgend vereinfacht Eurocode genannt, ähneln. Im Folgenden werden die Empfehlungen des International Institute of Welding (IIW) [16], der FKM-Richtlinie zur Auslegung von Maschinenbauteilen [17] und der Kranbaunorm DIN EN 13001-3-1 [18] vorgestellt und die Unterschiede zum Eurocode [1] herausgearbeitet.

2.3.3.1 Empfehlungen zur Ermüdungsbemessung nach IIW-Empfehlungen

Recommendations for fatigue design according to IIW recommendations

Das prinzipielle Vorgehen bei der Ermüdungsbemessung gemäß IIW-Empfehlungen [16] entspricht grundsätzlich dem des Eurocodes. Dabei ist die Dokumentation jedoch deutlich

ausführlicher und das Nachweisverfahren ist ebenfalls umfassender. Wesentliche Unterschiede betreffen den Kerbfallkatalog, die Ausweitung auf Aluminiumkonstruktionen, die Form der Wöhlerkurven, die Berücksichtigung verschiedener Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit und Berechnungsansätze mittels Bruchmechanik. Neben dem Nennspannungskonzept, das analog zum Eurocode angewandt wird, beschreiben die IIW-Empfehlungen [16] außerdem die Berechnung mittels lokaler Konzepte sehr ausführlich. Auf diese Regelungen wird in Abschnitt 2.3.4 detailliert eingegangen.

Zur Ermittlung der einwirkenden Spannungsschwingbreite werden die gleichen Zählverfahren wie im Eurocode aufgeführt. Zur Berechnung von Spannungskonzentrationsfaktoren wird in den IIW-Empfehlungen [16] im Vergleich zum Eurocode eine konkrete Berechnungsanleitung gegeben. Die Kerbfallklassifizierung wurde, wie in DIN EN 1993-1-9 [1] angegeben (nicht aber im zugehörigen Hintergrunddokument [9], siehe Abschnitt 2.3.2.4), mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % und einem zweiseitigen Toleranzintervall (siehe Abschnitt 3) von 75 % vorgenommen.

Was die Wöhlerlinien angeht, so existieren generell ähnliche Kurven wie in DIN EN 1993-1-9 [1] mit den gleichen Kerbfallklassen, die in den IIW-Empfehlungen mit „FAT“ bezeichnet werden. Die inverse Steigung beträgt bis zur abweichenden Dauerfestigkeit („Constant amplitude knee point“ CAKP) von $N_D = 10^7$ wie im Eurocode bei Längsspannungen $m = 3$. Bei Schubspannungen ist die Dauerfestigkeit ebenfalls abweichend bei $N_D = 10^8$ definiert und die Steigung beträgt analog zum Eurocode $m = 5$. Für das Grundmaterial mit FAT160 ist abweichend zu DIN EN 1993-1-9 [1] eine Steigung von $m = 5$ festgelegt worden. Diese Wöhlerlinie stellt gleichzeitig die obere Schranke für alle weiteren Wöhlerlinien dar und schneidet diese mit $m = 3$ ggf. oberhalb ab. Außerdem fehlt im Vergleich zu DIN EN 1993-1-9 [1] die Kerbfallkategorie 140.

Bild 2-6 zeigt die Wöhlerlinien der IIW-Empfehlungen [16]. Für hochzyklische Anwendungen enthalten die IIW-Empfehlungen [16] abweichend zum Eurocode modifizierte Wöhlerlinien, welche ab $N \geq 10^7$ nicht konstant, sondern mit einer inversen Steigung von $m = 22$ verlaufen [16].

Der Kerbfallkatalog ähnelt dem des Eurocodes. Einige Details der IIW-Empfehlungen besitzen abweichende Kerbfallklassen, Einige sind im Eurocode gar nicht zu finden und bei manchen Details existieren nach IIW [16] zusätzliche Varianten, wie zum Beispiel der Kreuzstoß mit verschiedenen Ausführungen der Schweißnähte und versätzten Anschlussblechen. Da sich das IIW vorwiegend mit geschweißten Konstruktionen befasst, fehlen für Schraubverbindungen relevante Details, wie die Schraube oder das gelochte Blech.

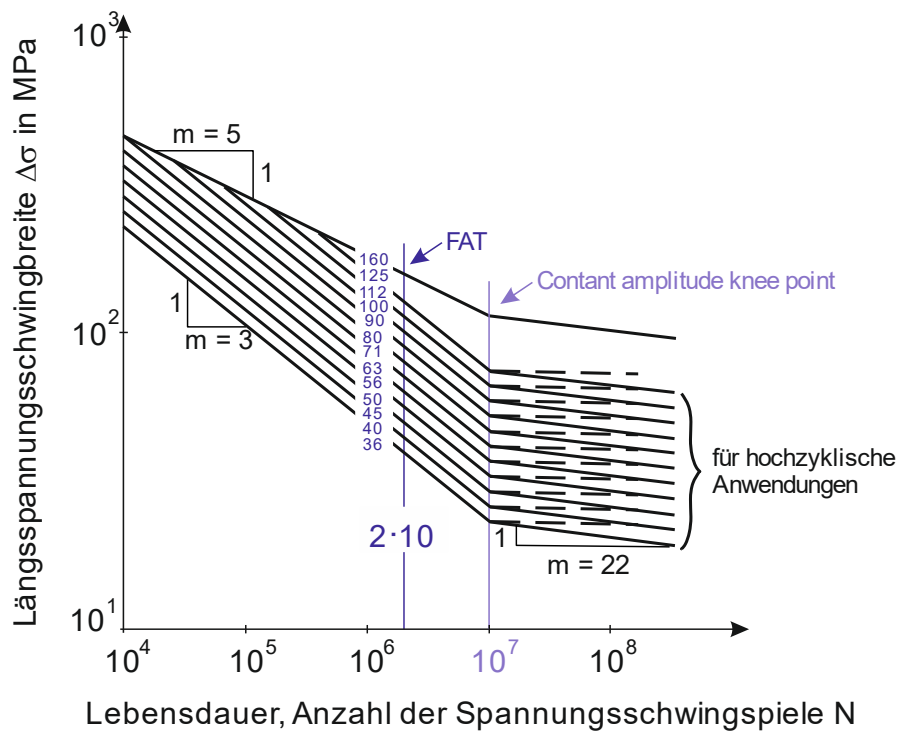


Bild 2-6: Ermüdungsfestigkeitskurven für Längsspannungsschwingbreiten nach IIW-Empfehlungen [16]

Figure 2-6: Fatigue strength curves for direct stress ranges according to IIW recommendations [16]

Die IIW-Empfehlungen [16] berücksichtigen weiterhin einige Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit, die derart detailliert in DIN EN 1993-1-9 [1] nicht erfasst werden. Die Kerbfallklassifizierung wurde auf Basis eines Spannungsverhältnisses von $R \geq 0,5$ durchgeführt. Für geringere Spannungsverhältnisse ist unter folgenden Umständen eine Modifikation der Kerbfallklasse durch einen Faktor $f(R)$ vorgesehen [16]:

1. Ungeschweißtes Grundmaterial und Schmiedeerzeugnisse mit vernachlässigbaren Eigenspannungen ($< 0,2 \cdot f_y$), spannungsarm geglühte Schweißkomponenten, bei denen die Auswirkungen von Zwängen oder sekundären Beanspruchungen bei der Analyse berücksichtigt wurden. Keine Zwänge bei der Montage.

$$f(R) = 1,6 \quad \text{für } R < -1 \text{ oder komplett im Druckbereich} \quad (2-13)$$

$$f(R) = -0,4 \cdot R + 1,2 \quad \text{für } -1 \leq R \leq 0,5 \quad (2-14)$$

$$f(R) = 1 \quad \text{für } R > 0,5 \quad (2-15)$$

2. Kleinskalige dünnwandige einfache Strukturelemente mit kurzen Schweißnähten. Bauteile oder Komponenten, die thermisch geschnittene Kanten enthalten. Keine Zwänge bei der Montage.

$$f(R) = 1,3 \quad \text{für } R < -1 \text{ oder komplett im Druckbereich} \quad (2-16)$$

$$f(R) = -0,4 \cdot R + 0,9 \quad \text{für } -1 \leq R \leq -0,25 \quad (2-17)$$

$$f(R) = 1 \quad \text{für } R > -0,25 \quad (2-18)$$

3. Komplexe zwei- oder dreidimensionale geschweißte Komponenten, Komponenten mit globalen Eigenspannungen, dickwandige Bauteile. Der Normalfall für geschweißte Bauteile und Strukturen:

$$f(R) = 1 \quad \text{Keine Modifizierung} \quad (2-19)$$

Weiterhin beziehen sich die Ermüdungsfestigkeiten auf eine Wanddicke bis zu 25 mm. Eine niedrigere Ermüdungsfestigkeit für dickere Elemente wird berücksichtigt, indem die FAT Klasse des Strukturdetails mit dem Dickenreduzierungsfaktor $f(t)$ multipliziert wird [16]:

$$f(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t_{eff}} \right)^n \quad (2-20)$$

Hierbei beträgt die Referenzdicke $t_{ref} = 25 \text{ mm}$. Die Variable n beschreibt den Dickenkorrektorexponent und ist abhängig von der Verbindungsart, siehe Tabelle 2-5.

Tabelle 2-5: Dickenkorrektorexponent nach IIW-Empfehlungen [16]

Table 2-5: Thickness correction exponents according to IIW recommendations [16]

Verbindungsart	Zustand	n
Kreuz- und querbelastete T-Stöße, Bleche mit Quersteifen, Enden von Längssteifen	Wie geschweißt	0,3
	Übergang geschliffen	0,2
Querbelastete Stumpfstöße	Wie geschweißt	0,2
Blecheben beschliffene Stumpfstöße, Grundmaterial, Längsnähte oder Anschweißsteile	Jeder	0,1

Wenn das Verhältnis des Abstands der Schweißnahtübergänge L zur Dicke t des Bauteils größer wird als der Wert 2, entspricht die effektive Dicke t_{eff} der Dicke t . Andernfalls nimmt t_{eff} den größeren Wert von t oder $0,5 \cdot L$ an. Ebenso kann der Einfluss eines dünneren Bauteils positiv berücksichtigt werden, was jedoch durch einen Bauteilversuch verifiziert werden sollte. Im Eurocode wird der Dickenreduktionsfaktor nur bei wenigen Details in einer ähnlichen Form angegeben. Dies betrifft Details in Tabelle 8.3 der DIN EN 1993-1-9 [1], querlaufende Stumpfnähte, wo der Dickenfaktor entsprechend IIW-Empfehlungen mit $n = 0,2$ angegeben ist, wobei t_{eff} immer der Blechdicke entspricht. In anderen Tabellen der DIN EN 1993-1-9 [1] ist der Dickeneinfluss so berücksichtigt, dass für einen bestimmten Dickenbereich statt eines Faktors direkt eine Kerbfallklasse angegeben ist, wie z.B. beim Kreuzstoß in Tabelle 8.5.

Des Weiteren kann der positive Effekt von Nachbehandlungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit einiger Details berücksichtigt werden. Dazu gehören beispielsweise durchgeschweißte Stumpf- und Kreuzstöße oder aufgeschweißte Steifen, wobei die potenzielle Rissstelle immer am Schweißnahtübergang liegen muss. Zu den Nachbehandlungen zählen zum einen Verfahren zur Verbesserung der Schweißnahtform wie Schleifen oder Wiederanschmelzen des Schweißnahtübergangs durch WIG-Behandlungen. Außerdem kann die Eigenspannungsverteilung durch Peening (Hammer- oder Nadelbehandlung) verbessert werden. Die Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit wird je nach Nachbehandlungsmethode und Spannungskonzept als Vergrößerungsfaktor angegeben, beschränkt durch eine maximal erreichbare FAT Klasse, wobei ggf. auch nach dem Spannungsverhältnis unterschieden wird [16].

Außerdem kann der Einfluss von Imperfektionen gemäß Tabelle 2-6 berücksichtigt werden.

Tabelle 2-6: Kategorisierungs- und Bewertungsverfahren für Schweißimperfectionen [16]

Table 2-6: Categorisation and assessment procedure for weld imperfections [16]

Auswirkung der Imperfektion		Art der Imperfektion	Berücksichtigung
Erhöhung des allgemeinen Spannungsniveaus		Versatz	Formeln für Spannungsvergrößerungsfaktoren
Lokale Kerbwirkung	additiv	Schweißformfehler, Einbrandkerbe	Tabellenwerte
	kompetitiv	Porosität und nicht oberflächennahe Einschlüsse	Tabellenwerte
Rissähnliche Imperfektion		Risse, Bindefehler und ungenügende Durchschweißung, alle Arten von anderen Imperfektionen als hier angegeben	Bruchmechanik

Dabei geben Tabellenwerte die Kerbfallklasse in Abhängigkeit der Imperfektionsgröße, der Nahtart und der Nachbehandlungsmethode an. Zudem ist im Anhang der IIW-Empfehlungen [16] eine Korrelation zwischen Ermüdungsfestigkeiten und Schweißnahtunregelmäßigkeiten gemäß DIN EN ISO 5817 [19] in Form einer Tabelle gegeben.

Außerdem existiert ein Konzept zur Abminderung der Ermüdungsfestigkeit bei höheren Temperaturen als 100 °C. Zusätzlich empfiehlt das IIW, dass die Ermüdungsfestigkeit bei Meeresumgebungen nur zu 70% angesetzt und kein Knickpunkt in der Wöhlerlinie berücksichtigt werden sollte [16].

Bei der Nachweisführung werden Schädigungsanteile aus Normal- und Schubspannungen wie im Eurocode, wenn erforderlich, addiert, wobei die ertragbare Schädigungssumme D in Abhängigkeit des Verhältnisses der Spannungen (proportional oder unkorreliert) und der Belastung (konstante oder variable Amplituden) ggf. nur den Wert 0,5 statt 1,0 annehmen darf. Wenn nicht nur konstante, sondern auch variable Spannungsschwingbreiten auftreten, muss die inverse Steigung der Wöhlerlinien nach der Dauerfestigkeit N_D auf den Wert $m = 9$ (bei Grundmaterial und Schubspannungen) oder $m = 5$ (alle anderen FAT Klassen) geändert werden [16].

Beim Nachweis wird nach dem Konzept der unbegrenzten Lebensdauer, der sicheren Lebensdauer, der ausfallsicheren Lebensdauer und der Schadentoleranz unterschieden. Der Sicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite γ_M kann Werte zwischen 1,0 und 1,4 annehmen und hängt weitestgehend von dem Bemessungskonzept, den Schadensfolgen und der praktischen Erfahrung in den Anwendungsbereichen ab.

Alternativ geben die IIW-Empfehlungen Berechnungsansätze der Ermüdungsfestigkeit über Rissfortschrittsberechnung mit dem Paris-Gesetz oder durch Versuchsdurchführungen an. Zusätzlich werden Informationen zu Qualitätssicherung und Instandsetzungen von Komponenten bereit gestellt [16].

2.3.3.2 FKM-Richtlinie zur Auslegung von Maschinenbauteilen

Design of machine components according to FKM guideline

Das Nachweisverfahren nach FKM-Richtlinie [17] weicht etwas stärker von Eurocode ab als die Empfehlungen des IIW [16]. Dabei beruhen einige Regelungen der FKM-Richtlinie allerdings auf dem Eurocode und den IIW-Empfehlungen. Die Richtlinie gilt für den Maschinenbau und verwandte Bereiche. Dabei werden ebenfalls Regelungen für Bauteile aus Aluminium und Gusswerkstoffen behandelt. Neben dem Nachweisverfahren gegen

Ermüdung mittels Nennspannungen enthält die Richtlinie auch statische Festigkeitsnachweise und örtliche Konzepte, welche in Abschnitt 2.3.4 behandelt werden. Bild 2-7 zeigt den Berechnungsablauf des Ermüdungsnachweises nach FKM-Richtlinie mittels Nennspannungen.

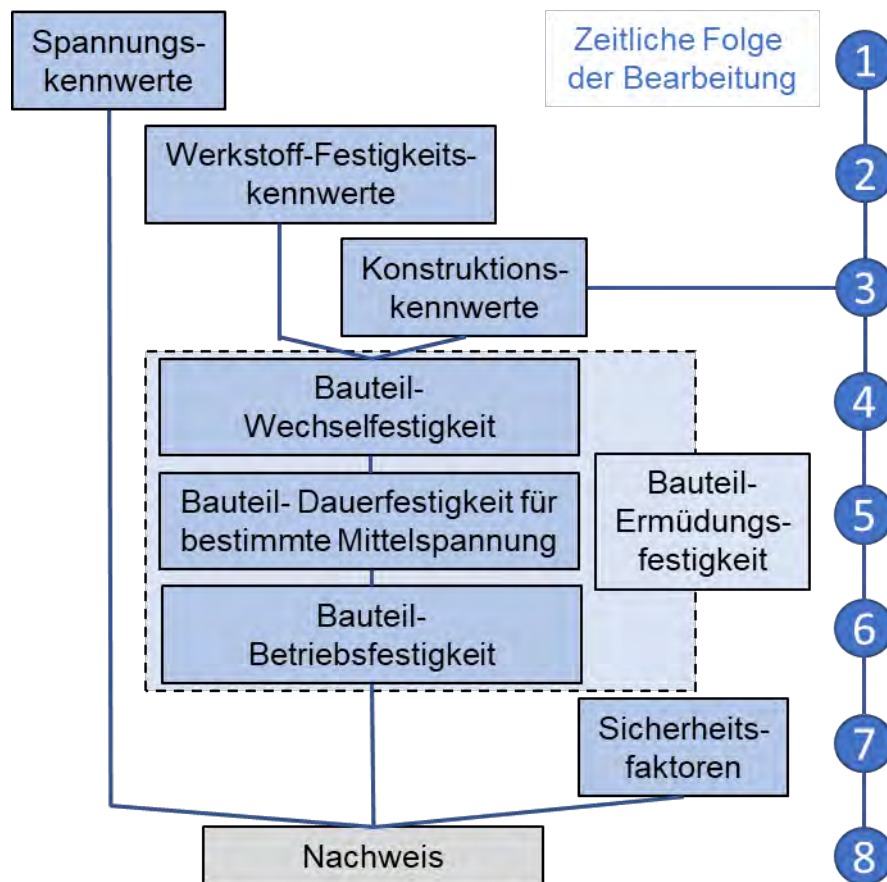


Bild 2-7: Berechnungsablauf des Ermüdungsnachweises nach FKM Richtlinie [17]

Figure 2-7: Calculation procedure of fatigue check according to FKM guideline [17]

Zunächst werden Spannungskennwerte ermittelt. Dabei bezieht sich die FKM-Richtlinie [17], anders als im Eurocode oder nach den IIW-Empfehlungen, nicht auf Spannungsschwingbreiten, sondern immer auf Spannungsamplituden. Es existiert weiterhin ein Kennwert für die Form des Kollektivs, das Völligkeitsmaß [17].

Da die Wöhlerlinie zunächst für ein Spannungsverhältnis von $R = -1$ errechnet wird, wird auch das Kollektiv über einen Mittelspannungsfaktor auf dieses Spannungsverhältnis umgerechnet. Ähnlich wie im Eurocode kann eine konstante Äquivalentspannungsamplitude berechnet werden, welche dem Spannungskollektiv schädigungsgleich ist.

Bild 2-8 zeigt die Wöhlerlinien der FKM-Richtlinie [17] für Längsspannungen. Dabei wird zwischen nicht geschweißten und geschweißten Bauteilen unterschieden. Zudem gibt die FKM-Richtlinie [17] das Diagramm nur qualitativ ohne die Bezeichnung der Kerbfallklassen an, die hier als „Bauteilkategorie“ oder „FAT“ bezeichnet werden. Im Fall von Längsspannungen besitzt der lineare Verlauf eine inverse Steigung von $m = 5$ für nichtgeschweißte und $m = 3$ für geschweißte Bauteile. Die Zyklenanzahl der Dauerfestigkeit, die als „Knickpunktzyklenzahl der Bauteil-Wöhlerlinie“ bezeichnet wird, ist für Längsspannungen bei nicht geschweißten Bauteilen bei 10^6 Zyklen und bei geschweißten Bauteilen bei $5 \cdot 10^6$ Zyklen festgelegt [17].

Für Schubspannungen besitzt der lineare Verlauf eine inverse Steigung von $m = 8$ für nichtgeschweißte und $m = 5$ für geschweißte Bauteile. Die Knickpunktzyklenzahl ist für Schubspannungen bei nicht geschweißten Bauteilen bei 10^6 Zyklen und bei geschweißten Bauteilen bei 10^8 Zyklen festgelegt [17].

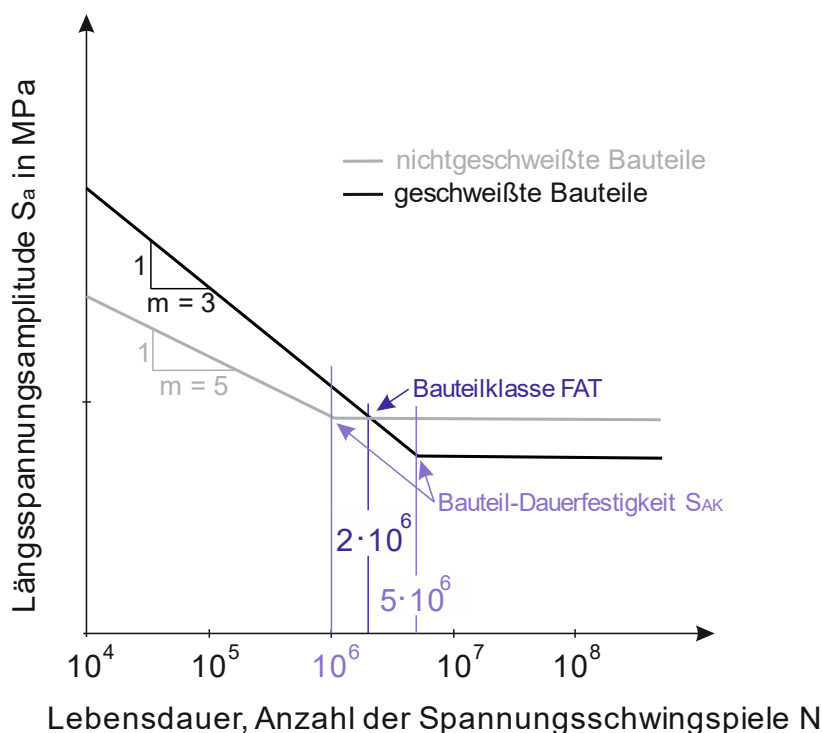


Bild 2-8: Ermüdungsfestigkeitskurven für Längsspannungsschwingbreiten nach FKM-Richtlinie [17]

Figure 2-8: Fatigue strength curves for direct stress ranges according to FKM guideline [17]

Die Schritte 2 bis 6 des Berechnungsablaufes enthalten die Festlegungen zur Berechnung der Bauteilwiderstände gegen Ermüdung. Im zweiten Schritt werden Werkstoff-Festigkeitskennwerte bestimmt, die von der Art der Belastung und der Zugfestigkeit abhängen. Ein Temperaturfaktor berücksichtigt die mit steigender Temperatur abnehmende Werkstoff-Wechselfestigkeit [17].

Die Ermüdungsfestigkeit nichtgeschweißter und geschweißter Bauteile wird im dritten Schritt unter Verwendung von Konstruktionsfaktoren festgelegt. Konstruktionskennwerte für ungeschweißte Stahlbauteile berücksichtigen für jede Art der Belastung die Kerbwirkungszahl, einen Rauheitsfaktor und einen Randschichtfaktor. Kerbwirkungszahlen berücksichtigen dabei den Einfluss der Gestalt eines Bauteils und können aus Formzahlen oder experimentell bestimmt werden. Der Rauheitsfaktor berücksichtigt den Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils. Der Randschichtfaktor berücksichtigt den Einfluss einer Randschicht auf die Ermüdungsfestigkeit. Randschichten können dabei positiv auf die Ermüdungsfestigkeit wirkend chemisch-thermisch, thermisch oder mechanisch behandelt sein [17].

Bei geschweißten Bauteilen bestehen die Konstruktionskennwerte aus der Bauteilkategorie FAT, einem Umrechnungsfaktor von der Bauteilkategorie auf die Bauteilwechselfestigkeit, einem Dicken- und dem Randschichtfaktor. Die Bauteilkategorien wurden in Anlehnung an IIW-Empfehlungen [16] und Eurocode 3 [1] festgelegt. Diese beziehen sich allerdings wie gewohnt auf Spannungsschwingbreiten. Außerdem fehlt hier die Kerbfallklasse 160 für den Grundwerkstoff [17].

Der Dickenfaktor entspricht den Regelungen der IIW-Empfehlungen [16], wobei die effektive Dicke immer die Bauteildicke ist. Allerdings kann der Dickenfaktor für Blechdicken zwischen 10 und 25 mm im Fall von eigener oder branchenspezifischer Erfahrung auch positiv berücksichtigt werden. Ein Mittelspannungsfaktor berücksichtigt den Einfluss der Mittelspannung, wobei das Spannungsverhältnis bei einem Spannungskollektiv auf das Spannungsverhältnis der größten Stufe bezogen wird. Im maschinenbautypischen Fall „Biegung und Torsion“ wird nicht die Einzelmittelspannung einer Spannungskomponente, sondern eine Vergleichsmittelspannung betrachtet. Bei geschweißten Bauteilen berücksichtigt ein Eigenspannungsfaktor den Einfluss der Eigenspannungen. Dabei werden Hilfestellungen zur Abschätzung der Höhe der Eigenspannungen gegeben [17].

Für den Nachweis werden die Maximalamplitude durch eine statische Festigkeit und die Bauteilfließgrenze in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses eingeschränkt. Bei einem Mehrstufenkollektiv können Miner-Verfahren angewandt werden, wobei eine effektive Miner Summe D_m berechnet werden muss, die für Stahl zwischen 0,3 und 1 liegen kann. Ein sogenannter Gesamtsicherheitsfaktor, der in Schritt 7 bestimmt wird, setzt sich aus einem Last-Sicherheitsfaktor, einem Material-Sicherheitsfaktor und dem Temperaturfaktor zusammen. Durch den Last-Sicherheitsfaktor kann abweichend von einer „sicheren“ Lastannahme auch eine „repräsentative“ Lastannahme berücksichtigt werden. Beim Material-Sicherheitsfaktor wird nach geschweißten und ungeschweißten Bauteilen, Schadensfolgen und Inspektionsmöglichkeit differenziert. Er kann Werte zwischen 1,2 und 1,5 annehmen [17].

Zur Nachweisführung im letzten Schritt wird ein zyklischer Auslastungsgrad berechnet, wobei nach einzelnen und zusammengesetzten Spannungsarten unterschieden wird. Solange der Auslastungsgrad unter 1 liegt, ist der Nachweis erbracht.

2.3.3.3 Ermüdungsbemessung von Kranen nach DIN EN 13001-3-1

Fatigue design of cranes according to DIN EN 13001-3-1

Die DIN EN 13001-3-1 [18] beinhaltet Regelungen zu Grenzzuständen und Sicherheitsnachweisen von Kranen. Neben Nachweiskonzepten der statischen Festigkeit und Stabilitätsnachweisen enthält die Norm ein Konzept zur Ermüdungsbemessung, ausschließlich auf der Basis von Nennspannungen [18].

Einwirkende Spannungen basieren in der Regel auf den Lastkombinationen A nach DIN EN 13001-2 [20], wobei die dynamischen Beiwerte φ_i berücksichtigt werden müssen. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden zu $\gamma_p = 1.0$ gesetzt [18].

Zur Berechnung der Spannungsschwingbreiten werden die gleichen Zählverfahren wie im Eurocode genannt. Des Weiteren existiert abweichend zum Eurocode ein „Spannungsverlaufparameter“ s_m . Dieser Parameter besitzt spezifische Werte für unterschiedliche Punkte im Tragwerk und hängt von der Anzahl der Schwingspiele, dem Nettolastkollektiv, der Krankonfiguration und der Wirkung der Kranbewegung ab. Er berechnet sich durch Multiplikation der „relativen Gesamtzahl der Häufigkeiten von Schwingbreiten“ mit einem „Spannungskollektivbeiwert“, der von der inversen Steigung der Wöhlerlinie m abhängt. Spannungsverläufe mit gleichem s_m -Wert werden als schädigungsgleich angenommen [18].

Die Wöhlerlinien in DIN EN 13001-3-1 [18] sind wie in der FKM-Richtlinie [17] nicht mit Bezeichnungen der Kerbklassen, sondern nur qualitativ angegeben, wobei für

Längsspannungen generell eine Steigung von $m = 3$ und für Schubspannungen $m = 5$ verwendet wird, siehe Bild 2-9.

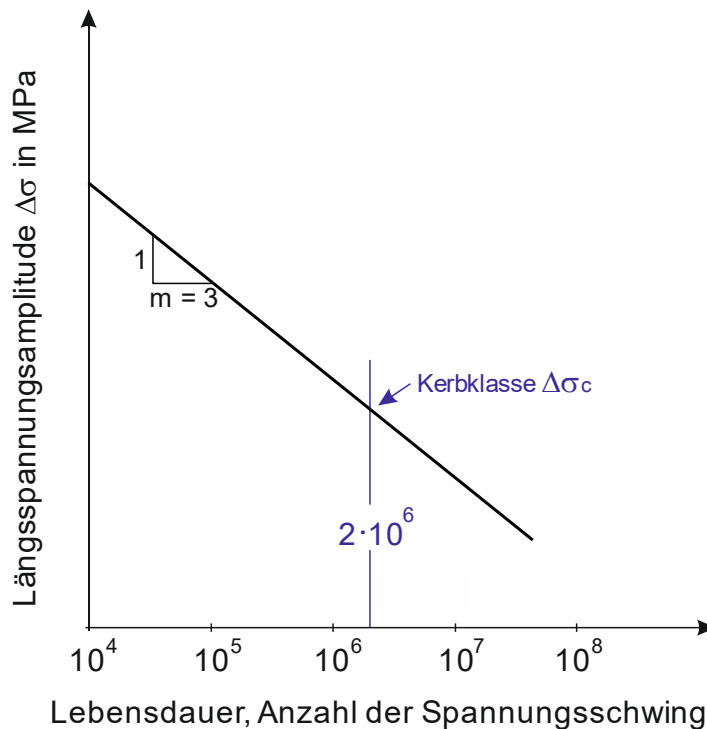


Bild 2-9: Ermüdungsfestigkeitskurven für Längsspannungsschwingbreiten nach EN13001-3-1

Figure 2-9: Fatigue strength curves for direct stress ranges according to EN13001-3-1

Im Vergleich zum Eurocode wird die Wöhlerlinie ohne Knickpunkte angewandt, sodass im Nachweis jede Spannungsschwingbreite berücksichtigt wird [18].

Die „Kerbklasse“ stellt dabei die Ermüdungsfestigkeit bei $2 \cdot 10^6$ Spannungsspielen mit konstanter Spannungsbreite und abweichend zum Eurocode mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,7 % (Mittelwert minus zweifache Standardabweichung, ermittelt durch Normalverteilung und einseitigen Test) dar. Des Weiteren gibt die Norm Anforderungen an die Durchführung von Ermüdungsversuchen an [18].

Die Kerbfalltabellen sind im Vergleich zum Eurocode ausführlicher gestaltet. Ein besonderes Merkmal ist die Berücksichtigung der Streckgrenze bei ungeschweißten Bauteilen. Außerdem wird bei ungeschweißten Bauteilen ebenfalls nach der Oberflächenbeschaffenheit nach EN 10163 [21] unterschieden. Durch die Berücksichtigung der Streckgrenze ergeben sich höhere Kerbklassen als 160, welche im Eurocode die maximal erreichbare Kerbfallkategorie ist. Die höheren Kategorien sind die Kerbklassen 180, 200, 225, 250, 280 und 315. Für ungeschweißte Bauteile wird die inverse Steigung der Wöhlerlinie $m = 5$ auch für Längsspannungen verwendet [18].

Bei geschweißten Bauteilen hängen die Kerbklassen u.U. von der Bewertungsgruppe nach DIN EN ISO 5817 [19] ab. Dabei wird zusätzlich zu den Klassen B, C, und D eine Bewertungsgruppe B* verwendet, für welche gewisse Anforderungen, zusätzlich zu denen der Gruppe B, gegeben werden. Dazu zählen z.B. Nachbehandlungen durch Schleifen, Begrenzung der Exzentrizität oder die Angabe eines maximalen Flankenwinkels. In den Kerbfalltabellen werden des Weiteren teilweise Grund- und Sonderbedingungen angegeben. Bei Sonderbedingungen, z.B. „fehlende Unregelmäßigkeiten durch Anfangs- oder Endstellen“ oder „Schweißen mit eingeschränktem Schrumpfverhalten“, kann oder muss der Kerbfall eine Klasse hoch- oder heruntergestuft werden [18]. Im Vergleich zum

Eurocode finden sich im Kerbfallkatalog der EN13001-3-1 [18] aufgrund des Anwendungsbereiches der Norm auf Krane zusätzliche Details, wie z.B. die aufgeschweißte Schiene oder der Gehrungsstoß von Hohlprofilen. Einige Kerbfallklassen klassischer Details weichen von denen des Eurocode ab.

Wie auch im Eurocode wird der Einfluss der Mittelspannung bei geschweißten Bauteilen gering eingeschätzt und nicht angesetzt. Ebenfalls dem Eurocode entsprechend kann die Druckspannungsschwingbreite bei nicht geschweißten oder spannungsarm geglühten geschweißten Bauteilen zu 60% angesetzt werden [18].

Entsprechend Eurocode wird für den Nachweis die Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner angewandt. Je nach Spannungsverlaufparameter s_3 , welcher auf der inversen Steigung $m = 3$ basiert, können Teile von Krantragwerken einer sogenannten S-Klasse zugeordnet werden. Die Grenzwerte der zulässigen Schwingbreiten eines Bauteils $\Delta\sigma_{Rd}$ für den Nachweis sind entweder durch direkte Anwendung des Spannungsverlaufparameters s_m oder durch vereinfachte Verfahren, basierend auf der Anwendung der S-Klasse, zu bestimmen. Gleichung (2-21) zeigt die Berechnung des Grenzwertes $\Delta\sigma_{Rd}$ über den Spannungsverlaufparameter s_m [18].

$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{MF} \cdot \sqrt[m]{s_m}} \quad (2-21)$$

Die Anwendung über S-Klassen erfolgt grundsätzlich analog, wobei in Abhängigkeit der S-Klasse der s_3 -Parameter wie in Gleichung (2-21) mit $m = 3$ angewandt wird. Für abweichende inverse Steigungen wird ein Anpassungsfaktor verwendet [18].

Der Sicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite γ_{MF} hängt von der Zugänglichkeit des Bauteiles, der Betriebssicherheit und der Gefährdung von Personen ab und kann Werte zwischen 1,0 und 1,25 annehmen [18].

Für jede Spannungskomponente muss der Nachweis gesondert geführt werden. Dabei wird bei nichtgeschweißten Bauteilen die maximale Hauptspannungsschwingbreite verwendet, wenn die Spannungskomponenten sich simultan verändern oder die Hauptspannungsebene im Laufe des Belastungsvorganges gleichbleibt. Zusätzlich zu den gesonderten Nachweisen für die Spannungskomponenten muss wie im Eurocode die kombinierte Ermüdungswirkung von gleichzeitig auf ein Bauteil einwirkenden Normal- und Schubspannungen berücksichtigt werden [18].

2.3.3.4 Zusammenfassung der Konzeptvergleiche

Summary of comparison of design methods

Die in den vorherigen Abschnitten erläuterten technischen Regeln besitzen Unterschiede bei der Methodik, dem Sicherheitsansatz und der Nachweisführung, sodass Bemessungsergebnisse deutlich abweichen können. Dies liegt nicht nur an unterschiedlichen Sicherheitskonzepten, sondern insbesondere an den Differenzen der jeweiligen Kerbfallkataloge.

Ein Anwendungsbeispiel zum Vergleich der unterschiedlichen Konzepte zum Nachweis gegen Ermüdung wurde von Feldmann et al. [22] erstellt. Dabei wird für eine beispielhafte Konfiguration des Konstruktionsdetails „Längssteife“ mit der Stahlgüte S355 die maximal ertragbare Spannungsschwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen entsprechend verschiedener Regelwerke [1, 16, 17, 18] ermittelt, siehe Tabelle 2-7. Da in den verschiedenen

Regelwerken unterschiedliche statistische Methoden zu Grunde gelegt werden, wurden die Ermüdungsfestigkeiten über eine abgeschätzte Standardabweichung mithilfe der Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}}$ zunächst auf einen charakteristischen Mittelwert $\Delta\sigma_{c,50\%}$ zurückgerechnet. Für diesen Wert wurde zum Vergleich der Normen die prozentuale Abweichung zum Eurocode [1] „Abw. zu EC“ berechnet.

Tabelle 2-7: Kategorisierungs- und Bewertungsverfahren für Schweißimperfectionen [22]

Table 2-7: Categorization and assessment procedure for weld imperfections [22]

	Einheit	EN 1993-1-9	IIV-Empfehlungen	FKM-Richtlinie	EN 13001-3-1
Kerbfall	-	Nr. 1, Tab 8.4	Nr. 521, Tab. {3.2}-1	Nr. 521, Tab. 5.4.1	Nr. 3.24, Tab. D.3
$\Delta\sigma_c$	MPa	56	63	63	63
$P_{\bar{u}}$	%	95	95	95	97,5
$\Delta\sigma_{c,50\%}$	MPa	72,7	81,8	81,8	86,4
Abw. zu EC	%	0	+12,5	+12,5	+18,9
zul. $\Delta\sigma_c$	MPa	72,7	81,8	90,7	86,4
γ_M	-	1,35	1,4	1,5	1,25
zul. $\Delta\sigma_c/\gamma_M$	MPa	53,8	58,4	60,5	69,1

Die zulässige Spannungsschwingbreite ohne Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors „zul. $\Delta\sigma_c$ “ nimmt bei der Berechnung nach FKM-Richtlinie [17] durch die Berücksichtigung des Werkstoffkennwertes einen etwas höheren Wert als den Mittelwert $\Delta\sigma_{c,50\%}$ an. Zur Annahme der Sicherheitsbeiwerte γ_M wurde eine konservative Bemessungsphilosophie verfolgt, ohne dass Inspektionen vorgesehen sind. Unter Anwendung der jeweiligen Sicherheitsbeiwerte ergeben sich dann die unterschiedlichen Bemessungswerte der Ermüdungsfestigkeit der verschiedenen Regelwerke [22].

Allgemein fällt auf, dass der charakteristische Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,50\%}$ bei der Berechnung mit dem Eurocode [1] den kleinsten Wert besitzt. Gemäß IIV-Empfehlungen [16] und FKM-Richtlinie [17] werden 12,5% größere Werte erreicht. Nach DIN EN 13001-3-1 [18] ist der Mittelwert sogar 18,9% größer. Ohne Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwertes ist die zulässige Spannungsschwingbreite nach FKM-Richtlinie [17] mit 90,7 MPa sogar noch größer. Unter Berücksichtigung der teilweise sehr unterschiedlichen Sicherheitsbeiwerte wird der größte Bemessungswert der zulässigen Spannungsschwingbreite „zul. $\Delta\sigma_c/\gamma_M$ “ mit der Berechnung nach DIN EN 13001-3-1 [18] erreicht. Die Kranbahnnorm interpretiert Krane im Vergleich zu Ingenieurbauten als kurzlebige Investitionsgüter und geht von erhöhten Anforderungen an die Ausführungsqualität aus [22].

2.3.4 Lokale Konzepte

Local concepts

Der Ermüdungsnachweis geschweißter Konstruktionen kann auf Basis verschiedener Methoden durchgeführt werden. Dazu gehören folgende Konzepte, welche in Bild 2-10 grafisch dargestellt sind:

- das Nennspannungskonzept,
- das Strukturspannungskonzept und
- das Kerbspannungskonzept.

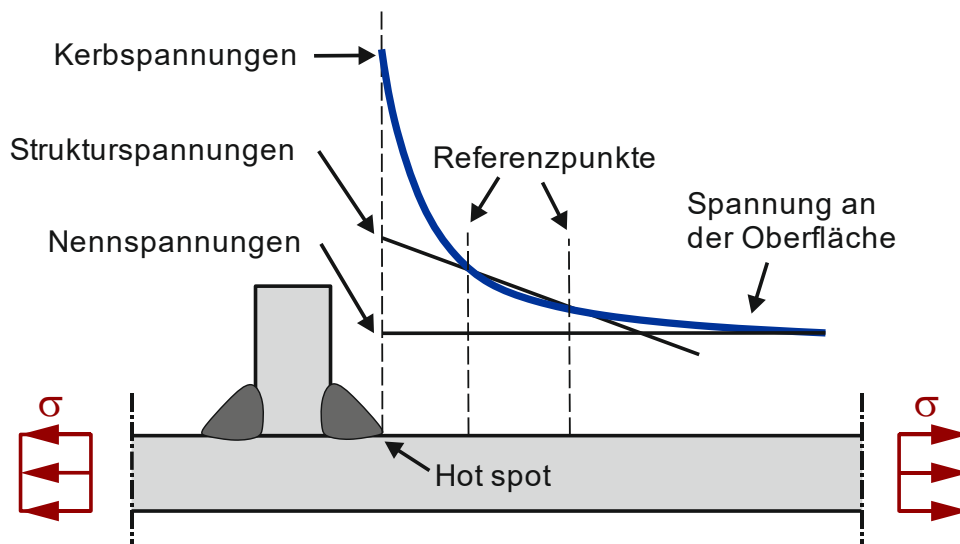


Bild 2-10: Grafische Darstellung unterschiedlicher Spannungskonzepte

Figure 2-10: Graphical representation of different stress concepts

Dabei stellt das Nennspannungskonzept die klassische Vorgehensweise dar, welche auch in gängigen Regelwerken zur Ermüdungsbemessung Anwendung findet, siehe Abschnitte 2.3.2 und 2.3.3. Die „Nennspannung“ σ_{nenn} ist die Spannung im Grundwerkstoff oder in der Schweißnaht, welche nach der elastischen Spannungstheorie ohne Berücksichtigung der örtlichen Kerbwirkung berechnet wird [1]. Dies führt als maßgeblicher Vorteil zur einfachen Anwendbarkeit des Nennspannungskonzepts. Kerbeffekte werden auf der Widerstandsseite durch Nennspannungs-Wöhlerlinien berücksichtigt, welche einem spezifischen Konstruktionsdetail zugeordnet sind. Hierdurch ergibt sich jedoch der Nachteil des Nennspannungskonzeptes: Denn eine nachzuweisende Stelle eines Bauteils muss zwingend einem Detail des Kerbfallkataloges der zugehörigen Norm entsprechen.

Lokale spannungserhöhende Effekte durch die Bauteilgeometrie können beim Nennspannungskonzept allerdings über Faktoren berücksichtigt werden. Durch Multiplikation der Nennspannung mit dem geometrischen Spannungskonzentrationsfaktor k_f ergeben sich sogenannte „korrigierte Nennspannungen“ $\sigma_{nenn,mod}$, siehe Gleichung (2-22).

$$\sigma_{nenn,mod} = k_f \cdot \sigma_{nenn} \quad (2-22)$$

Wenn ein Bauteil eine komplexe Grundgeometrie aufweist oder wenn Steifigkeitssprünge vorhanden sind, die zu einem nicht-linearen Spannungsanstieg führen, ist die Nachweisführung über das Nennspannungskonzept nicht möglich. Um örtliche Spannungsspitzen berücksichtigen zu können, werden lokale Konzepte angewandt, welche in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

2.3.4.1 Strukturspannungskonzept

Structural hot spot stress concept

Das Strukturspannungskonzept stellt eine Weiterentwicklung des Nennspannungskonzeptes dar. Die „Strukturspannung“ (Structural hot spot stress) σ_{HS} wird ebenfalls auf Basis eines linear-elastischen Werkstoffverhaltens berechnet. Im Gegensatz zum Nennspannungskonzept werden beim Strukturspannungskonzept neben Einflüssen aus der globalen Bauteilgeometrie auch makrogeometrische Effekte berücksichtigt. Denn die Strukturspannung stellt die maximale Hauptspannung im Grundwerkstoff unmittelbar an der potenziellen Rissstelle am Schweißnahtübergang dar, einschließlich der lokalen

Spannungsspitze durch die geometrische Ausbildung des Bauteils [1]. Nichtlineare Spannungskonzentrationen durch das Schweißnahtdetail fließen jedoch nicht in die Berechnung ein. Die Berechnung der Strukturspannung σ_{HS} erfolgt ähnlich zur korrigierten Nennspannung mit einem als Strukturformzahl k_{HS} bezeichnetem Faktor, siehe Gleichung (2-23).

$$\sigma_{HS} = k_{HS} \cdot \sigma_{nenn} \quad (2-23)$$

Die Bestimmung dieses Faktors erfolgt entweder experimentell oder mit Hilfe numerischer Methoden, z.B. der Finiten-Elemente-Analyse.

In der der DIN EN 1993-1-9 [1] fehlen Anleitungen zur Bestimmung der Strukturspannung gänzlich. Die IIW-Empfehlungen [16] beinhalten hingegen ausführliche, interdisziplinär anerkannte Regelungen zur Bestimmung von Strukturspannungen, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden. Die Anwendung des Konzeptes ist auf Details mit potentiellen Rissstellen am Schweißnahtübergang beschränkt, siehe Bild 2-11.

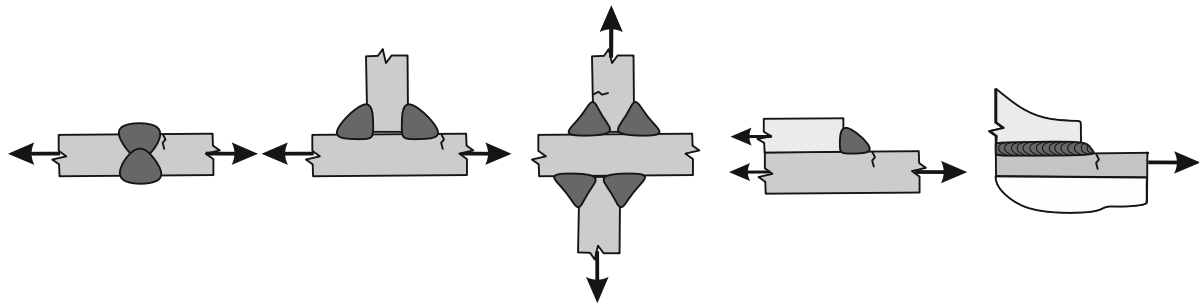


Bild 2-11: Geeignete Details zur Anwendung des Strukturspannungskonzeptes [16]

Figure 2-11: Suitable details for the application of the structural hot spot stress concept [16]

Im Falle eines biaxialen Spannungszustandes an der Plattenoberfläche wird empfohlen, die Hauptspannung zu verwenden, die etwa senkrecht zum Schweißnahtübergang, d.h. innerhalb von $\pm 60^\circ$, wirkt. Die andere Hauptspannung kann gegebenenfalls unter Verwendung der Kerbfallklasse nach Nennspannungskonzept für Schweißnähte parallel zur Spannung analysiert werden.

Zur numerischen Berechnung der Strukturspannung nach [16] kann entweder eine Innenlinearisierung des Spannungsverlaufes in Bauteildickenrichtung oder eine Extrapolation am Schweißnahtübergang durchgeführt werden, wobei in diesem Abschnitt nur auf letztere Methode eingegangen wird. Es wird zwischen zwei Arten von Hot-Spots unterschieden, welche sich aus der Geometrie des zu bemessenden Bauteils ergeben, siehe Bild 2-12.

Die Strukturspannung an den Hot-Spots kann über Referenzpunkte aus dem Spannungsverlauf an der Bauteiloberfläche extrapoliert werden. Dabei sind die Referenzpunkte so zu wählen, dass keine Beeinflussung durch die Schweißkerbe entsteht. Dazu sollte die erste Stützstelle einen minimalen Abstand von $0,4 \cdot t$ zum Hot-Spot haben, wobei t die Bauteildicke darstellt [16].

- a) Schweißnahtübergang angeordnet auf der Bauteiloberfläche
- b) Schweißnahtübergang angeordnet an der Bauteilkante

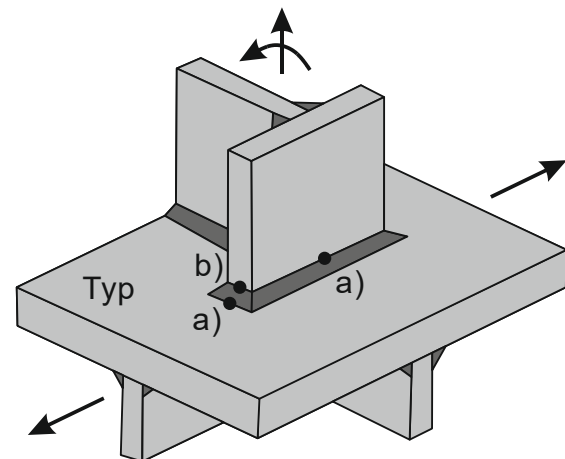


Bild 2-12: Hot-Spot-Arten nach IIW-Empfehlungen [16]

Figure 2-12: Hot spot types according to IIW recommendations [16]

Das IIW gibt weiterhin Empfehlungen zur Finite-Elemente-Modellierung, wenn die Strukturspannung, wie in der Regel üblich, numerisch bestimmt wird. Je nach Anwendungsfall werden Anforderungen an die Diskretisierung und die Referenzpunkte bereitgestellt. Generell werden Rechteck- oder Hexaeder Elemente höherer Ordnung mit geeigneter Diskretisierung in Form von Schalen- oder Volumenmodellen empfohlen, siehe Bild 2-13.

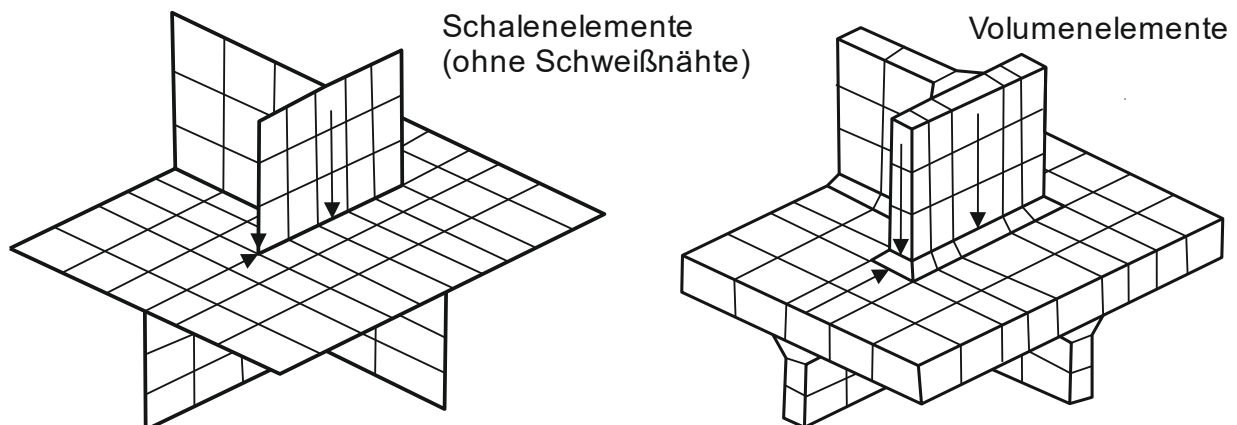


Bild 2-13: Hot-Spot-Arten nach IIW-Empfehlungen [16]

Figure 2-13: Hot spot types according to IIW recommendations [16]

Die Extrapolationsgleichungen hängen von der Hot-Spot-Art ab, siehe Bild 2-12. Dabei werden für Typ a) folgende Möglichkeiten aufgeführt:

1. Feine Diskretisierung mit Elementlänge von maximal $0,4 \cdot t$ am Hot-Spot. Lineare Extrapolation mit zwei Referenzpunkten bei $0,4 \cdot t$ und $1 \cdot t$, siehe Gleichung (2-24).

$$\sigma_{HS} = 1,67 \cdot \sigma_{0,4 \cdot t} - 0,67 \cdot \sigma_{1 \cdot t} \quad (2-24)$$

2. Feine Diskretisierung mit Elementlänge von maximal $0,4 \cdot t$ am Hot-Spot. Quadratische Extrapolation mit drei Referenzpunkten bei $0,4 \cdot t$, $0,9 \cdot t$ und $1,4 \cdot t$, siehe Gleichung (2-25). Diese Methode wird bei starkem Anstieg der Spannungen am Hot-Spot, bei starker Änderung der Beanspruchungsrichtung oder bei dickwandigen Konstruktionsdetails empfohlen.

$$\sigma_{HS} = 2,52 \cdot \sigma_{0,4 \cdot t} - 2,24 \cdot \sigma_{0,9 \cdot t} + 0,72 \cdot \sigma_{1,4 \cdot t} \quad (2-25)$$

3. Grobe Diskretisierung mit höherwertigen Elementen, deren Länge am Hot-Spot der Plattendicke entspricht. Lineare Extrapolation mit zwei Referenzpunkten bei $0,5 \cdot t$ und $1,5 \cdot t$, siehe Gleichung (2-26).

$$\sigma_{HS} = 1,5 \cdot \sigma_{0,5 \cdot t} - 0,5 \cdot \sigma_{1,5 \cdot t} \quad (2-26)$$

Für Hot-Spot-Typ b) sind die Referenzpunkte und die Spannungsverteilung von der Bauteildicke unabhängig und es werden folgende Methoden empfohlen:

1. Feine Diskretisierung mit Elementlängen von maximal 4 mm am Hot-Spot. Quadratische Interpolation mit drei Referenzpunkten an den Stellen 4 mm, 8 mm und 12 mm, siehe Gleichung (2-27).

$$\sigma_{HS} = 3 \cdot \sigma_{4mm} - 3 \cdot \sigma_{8mm} + \sigma_{12mm} \quad (2-27)$$

2. Grobe Diskretisierung mit höherwertigen Elementen mit einer Länge von 10 mm am Hot-Spot. Lineare Extrapolation von zwei Referenzpunkten an den Seitenmittelknoten der ersten beiden Elemente bei 5 mm und 15 mm, siehe Gleichung (2-28).

$$\sigma_{HS} = 1,5 \cdot \sigma_{5mm} - 0,5 \cdot \sigma_{15mm} \quad (2-28)$$

Während bei korrigierten Nennspannungen die Widerstände des Nennspannungs-Kerbfallkatalogs angesetzt werden, stammen die Widerstandswerte für Strukturspannungen aus einem separaten Kerbfallkatalog. Derartige Kerbfallkataloge für Strukturspannungen sind auf wenige Grundfälle reduziert, da die Detailgeometrie auf der Einwirkungsseite erfasst wird [1, 16].

Der Strukturspannungs-Kerbfallkatalog der DIN EN 1993-1-9 [1] enthält im Vergleich zu dem der IIW-Empfehlungen [16] ein zusätzliches Detail, den Stumpfstoß mit geschliffenen Nähten. Dafür fehlen jedoch in DIN EN 1993-1-9 [1] „Typ b“ Kerbfälle an der Verbindung eines Anschlussblechs, wo in den IIW-Empfehlungen je nach Länge des Anschlussblechs in Belastungsrichtung zwei Kerbfälle existieren. Weiterhin enthalten die IIW-Empfehlungen den Überlappstoß, der im Eurocode ebenfalls fehlt. In der FKM-Richtlinie [17] wurde die Strukturspannungs-Kerbfalltabelle der IIW-Empfehlungen komplett übernommen. Zur Ermittlung der einwirkenden Strukturspannung werden hier wie in den IIW-Empfehlungen die Innenlinearisierung und die Oberflächenextrapolation erwähnt, allerdings ohne konkrete Berechnungsempfehlung.

2.3.4.2 Kerbspannungskonzept

Effective notch concept

Die Ermittlung von Kerbspannungen geschieht ebenso wie bei Nenn- und Strukturspannungen unter der Voraussetzung eines linear-elastischen Materialverhaltens. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Konzepten werden jedoch beim Kerbspannungskonzept alle Effekte der Spannungserhöhung, also auch lokale Spannungen am Schweißnahtübergang oder an der Schweißnahtwurzel, erfasst. Auf diese Weise kann die Detailgestalt einer Schweißnaht in die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit integriert werden [23]. In Analogie zur Strukturformzahl wird die Relation zwischen Kerbspannung σ_k und Nennspannung durch die Kerbwirkungszahl k_k hergestellt, siehe Gleichung (2-29).

$$\sigma_k = k_k \cdot \sigma_{nenn} \quad (2-29)$$

In diesem Abschnitt wird das Kerbspannungskonzept analog zu den IIW-Empfehlungen [16] beschrieben, welches auf Untersuchungen verschiedener Autoren zurückgeht [24, 25, 26, 27]. Weiterhin sind ausführliche Informationen in einer Richtlinie zum Kerbspannungskonzept vom IIW [23] zu finden. Ferner hat der Deutsche Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (DVS) im Jahr 2017 ein deutschsprachiges Merkblatt zur industriellen Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für den Ermüdungsnachweis von Schweißverbindungen [28] herausgegeben.

Die Grundidee des Kerbspannungskonzeptes ist die Idealisierung Kerbgrunds, da es bei der Berechnung nicht möglich ist, alle Kerbwirkungen der Schweißnaht auf die Ermüdungsfestigkeit zu berücksichtigen. Dies geschieht in der Regel auf numerischer Basis durch die Modellierung mittels Referenzradien, an welchem örtliche Vergleichs- oder Hauptnormalspannungen berechnet werden, siehe Bild 2-14.

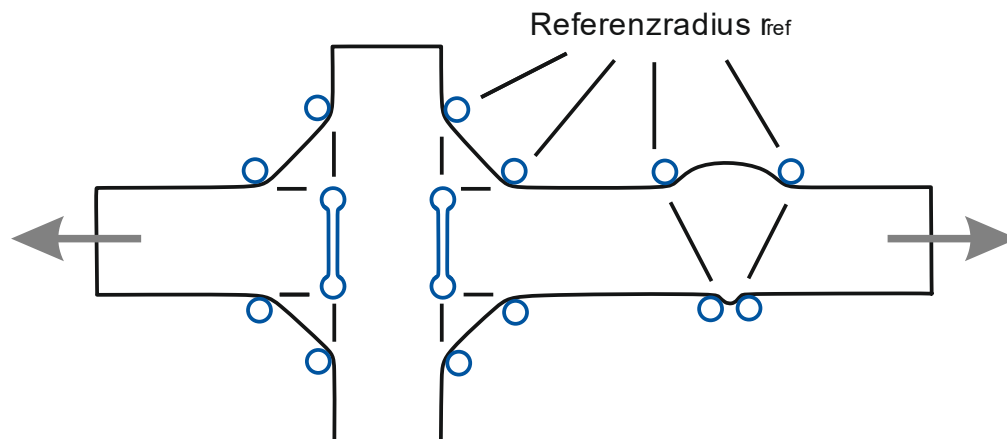


Bild 2-14: Fiktive Abrundungen von Schweißnahtübergängen und -wurzeln [16]

Figure 2-14: Fictitious rounding of weld toes and roots [16]

Der Referenzradius r_{ref} lässt sich nach folgender Gleichung bestimmen [23, 27]:

$$r_{ref} = r + s \cdot r^* \quad (2-30)$$

Hierbei stellt r den eigentlichen Kerbradius dar, s ist ein Faktor für die Spannungsmehrachsigkeit und Festigkeitskriterium und r^* beschreibt die Ersatzmikrostrukturlänge. Nach Radaj [25] kann der Faktor s zu 2,5 angenommen werden und für Stahl sei ein r^* -Wert von 0,4 mm angemessen [27]. Somit wird der Kerbradius r um $2,5 \cdot 0,4 = 1 \text{ mm}$ erhöht. Konservativ kann also ein Referenzradius r_{ref} von 1 mm angenommen werden, wenn man davon ausgeht, dass der Kerbradius theoretisch im kritischsten Fall 0 mm beträgt [23]. Die Größe des anzusetzenden Referenzradius hängt allerdings von der Dicke des betrachteten Bauteils ab. In der DVS-Richtlinie [28] sind Empfehlungen für Referenzradien in Abhängigkeit des Versagensortes und der Blechdicke eines Bauteils gegeben, siehe Bild 2-15.

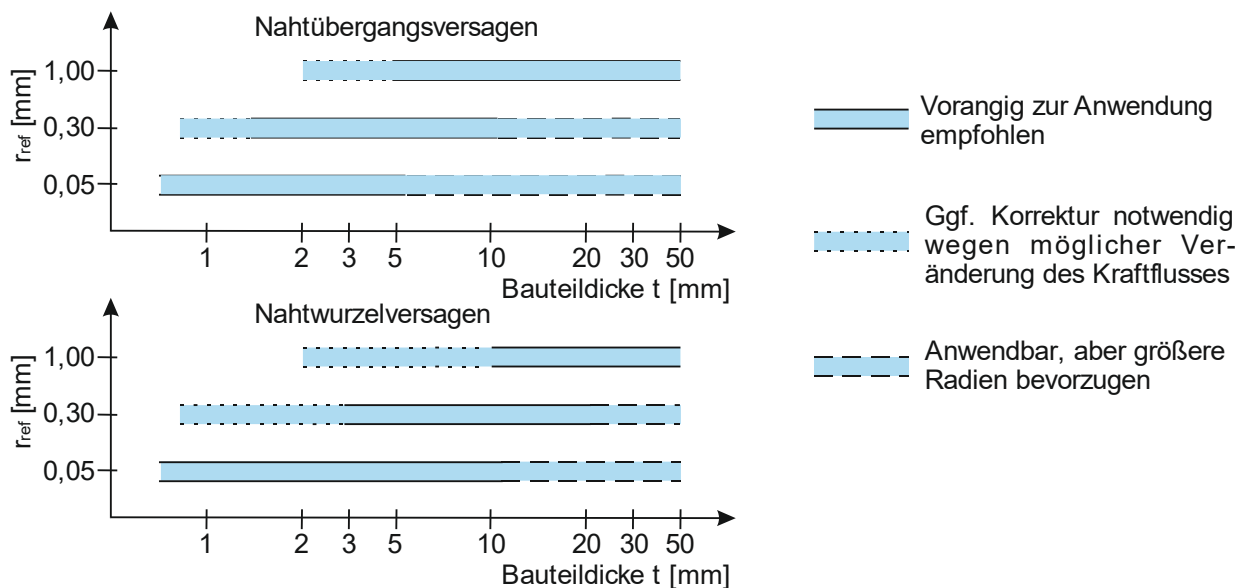


Bild 2-15: Empfehlungen für Referenzradien von Nahtübergangs- und Nahtwurzelkerben [28]

Figure 2-15: Recommendations for reference radii of weld toe and weld root notches [28]

Die dort zu erkennenden Grenzwerte lassen sich auf die Querschnittsschwächung infolge der Kerbe zurückführen, da gerade bei dünnen Blechen die Steifigkeit der Schweißnaht und somit der Kraftfluss im Bauteil durch die Größe des Radius beeinflusst wird. Empfehlungen für Radien oberhalb einer Blechdicke von 50 mm fehlen.

Neben der Größe des Referenzradius hat die Diskretisierung im Bereich der Kerbe einen maßgebenden Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Tabelle 2-8 zeigt die empfohlenen Maximallängen und Minimalanzahlen in Abhängigkeit des Elementansatzes.

Tabelle 2-8: Empfehlungen für Elementgrößen (längs und quer zur Kerboberfläche) [23]

Table 2-8: Recommendations for element sizes (along and vertical to notch surface) [23]

Elementansatz	Relative Länge	Elementlänge bei $r_{ref} = 1 \text{ mm}$	Elementanzahl entlang eines 45°-Bogens	Elementanzahl entlang eines 360°-Bogens
Quadratisch	$\leq r_{ref}/4$	$\leq 0,25 \text{ mm}$	≥ 3	≥ 24
Linear	$\leq r_{ref}/6$	$\leq 0,15 \text{ mm}$	≥ 5	≥ 40

In an die Bögen angrenzenden geraden Bereichen sollte das erste Element die gleiche Länge wie im gebogenen Bereich aufweisen. Die Elementlänge normal zur Kerbe sollte ebenfalls zunächst kleiner gewählt werden und allmählich in Normalenrichtung vergrößert werden [23]. Bild 2-16 zeigt eine typische Diskretisierung eines Schweißnahtübergangs und einer Schweißnahtwurzel mit einem quadratischen Elementansatz. Aufgrund der geforderten feinen Diskretisierung wird oft die Nutzung von Submodellen notwendig. Dabei kann das Bauteil als „Globalmodell“ gröber vernetzt sein, während nur der relevante Part in einem kleinen Ausschnitt, dem „Submodell“, fein vernetzt wird.

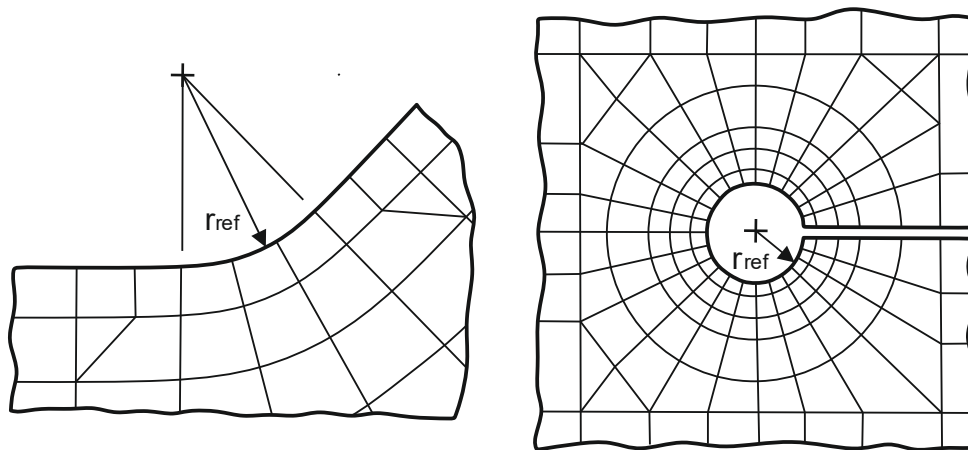


Bild 2-16: Typisches Netz mit Elementen mit quadratischer Ansatzfunktion am Schweißnahtübergang (links) und an der Schweißwurzel (rechts) [23]

Figure 2-16: Typical mesh with elements having quadratic displacement function at weld toe (left) and weld root (right) [23]

Da bei der Anwendung des Kerbspannungskonzeptes alle geometrischen Effekte bereits auf der Einwirkungsseite im numerischen Modell berücksichtigt werden, dient eine einzige Wöhlerlinie als Widerstand. Für einen Referenzradius von $r_{ref} = 1 \text{ mm}$ beträgt die charakteristische Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 225 \text{ MPa}$ bei $2 \cdot 10^6$ Zyklen mit einer inversen Steigung von $m = 3$ für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_s = 97,7\%$. Diese Ermüdungsfestigkeit basiert außerdem auf einem Spannungsverhältnis von $R \geq 0,4$ und der Berechnung mit Hauptspannungen und ist nur für scharfe Kerben gültig [23].

Falls maßgebliche Spannungskomponenten parallel zur Schweißnaht auftreten, ist die Anwendung des Kerbspannungskonzeptes nicht empfohlen. Zudem sollte die Kerbspannung größer als das 1,6-Fache der Strukturspannung am Schweißnahtübergang sein. Weitere Angaben zur praxisgerechten Anwendung des Kerbspannungskonzeptes sind in [28, 29] zu finden.

Insgesamt zeichnet sich das Kerbspannungskonzept gegenüber anderen Nachweiskonzepten durch eine große Vielseitigkeit der Anwendung aus. So können neben Aussagen über Spannungsspitzen und Kraftflüssen in Nahtübergang und -wurzel auch andere Nahtparameter, wie beispielsweise gekrümmte Flanken oder ungleiche Flankenwinkel der Schweißnaht berücksichtigt werden. Ein weiterer, weitreichender Vorteil des Kerbspannungskonzeptes liegt in der Kombination mit anderen Spannungskonzepten. So lassen sich mithilfe der Strukturspannungen die kritischen Stellen eines Bauteils ausmachen, welche im Anschluss unter der Verwendung von Submodellen in Bezug auf ihre Kerbspannung ausgewertet werden können. Gegenüber einer FE-Modellierung zur Bestimmung der Strukturspannungen stellt das Kerbspannungskonzept einen stark erhöhten Komplexitätsgrad dar, welcher aber gerade mit Betrachtung moderner Rechenkapazitäten keine große Einschränkung mehr bedeutet.

2.4 Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit

Influences on fatigue strength

2.4.1 Mittelspannungseinfluss

Mean stress effect

Bei Ermüdungsbeanspruchungen wird für gleiche Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma$ bzw. Spannungsamplituden σ_a in Abhängigkeit der Mittelspannung σ_m zwischen den Beanspruchungsbereichen Druckschwell-, Wechsel- und Zugschwellbeanspruchung unterschieden (Bild 2-17), siehe auch Abschnitt 2.2. Anstatt der Mittelspannung σ_m kann auch das Spannungsverhältnis R zur Charakterisierung der Ermüdungsbeanspruchung verwendet werden. Das Spannungsverhältnis R kann wie folgt ermittelt werden:

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} = \frac{\sigma_m - 0,5 \cdot \Delta\sigma}{\sigma_m + 0,5 \cdot \Delta\sigma} \quad (2-31)$$

Dabei sind σ_o die Oberspannung und σ_u die Unterspannung.

Ausgehend vom Spannungsverhältnis R kann die Mittelspannung σ_m nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\sigma_m = \sigma_a \cdot \frac{1 + R}{1 - R} = \frac{1}{2} \cdot \Delta\sigma \cdot \frac{1 + R}{1 - R} \quad (2-32)$$

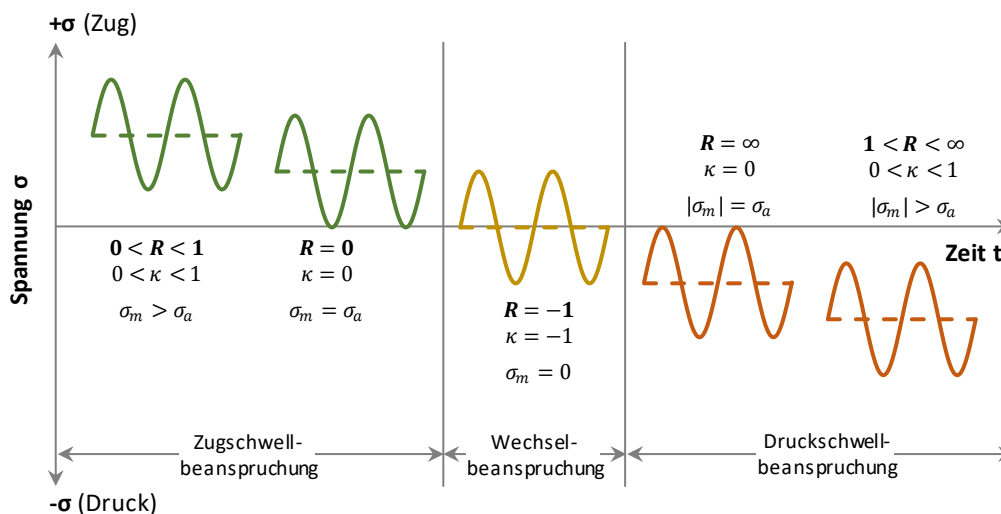


Bild 2-17: Unterschiedliche Beanspruchungsbereiche im Dauerschwingversuch

Figure 2-17: Different stress ratios in fatigue testing according

Der Einfluss der Mittelspannung auf die Ermüdungsfestigkeit lässt sich in Dauerfestigkeits-Schaubildern darstellen. Bei der Darstellung im Haigh-Diagramm (Bild 2-18) wird die Spannungsamplitude über der Mittelspannung aufgetragen. Daraus ergibt sich, dass Punkte auf der Ordinate einem Spannungsverhältnis von $R = -1,0$ und Punkte auf der 1. Winkelhalbierenden einem Spannungsverhältnis von $R = 0,0$ entsprechen. Durch eine 45° -Drehung des Koordinatensystems um den Ursprung können die zu den jeweiligen Punkten gehörenden Ober- und Unterspannungen direkt abgelesen werden. Die Maximalwerte für Ober- und Unterspannungen liegen auf Höhe der Streckgrenze und grenzen den Darstellungsbereich im Haigh-Diagramm ab.

Über die Dauerfestigkeitslinie ($N = \infty$) kann der Einfluss der Mittelspannung im Dauerfestigkeitsbereich abgeschätzt werden. Charakterisiert werden kann die Dauerfestigkeitslinie über die Mittelspannungsempfindlichkeit M , welche nach einem Vorschlag von Schütz [30] wie folgt definiert ist:

$$M = \frac{\sigma_{a,R=-1,0} - \sigma_{a,R=0,0}}{\sigma_{m,R=0,0}} \quad (2-33)$$

Die Mittelspannungsempfindlichkeit M beschreibt dabei die Neigung der Sekanten der Dauerfestigkeitslinie zwischen den Spannungsverhältnissen $R = -1,0$ und $R = 0,0$.

Zur Veranschaulichung von M können zwei Grenzfälle betrachtet werden: Für $M = 0,0$ verläuft die Sekante zwischen $R = -1,0$ und $R = 0,0$ horizontal. Dann hängt die Ermüdungsfestigkeit ausschließlich von der Spannungsamplitude (bzw. Spannungsschwingbreite) ab. Die Mittelspannung hat dann keinen Einfluss auf die Lebensdauer des Bauteils. Für $M = 1,0$ verläuft die Sekante unter einem Winkel von 45° zu den Hauptachsen des Koordinatensystems. In diesem Fall kann bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1,0$ im Gegensatz zu $R = 0,0$ die doppelte Spannungsamplitude angesetzt werden, um die gleiche Bauteillebensdauer zu erhalten. Für $M = 1,0$ hängt die Ermüdungsfestigkeit nur von der Oberspannung ab. In diesem Grenzfall sind bei der Lebensdauerabschätzung die Mittelspannung und Spannungsamplitude gleichwertig zu berücksichtigen.

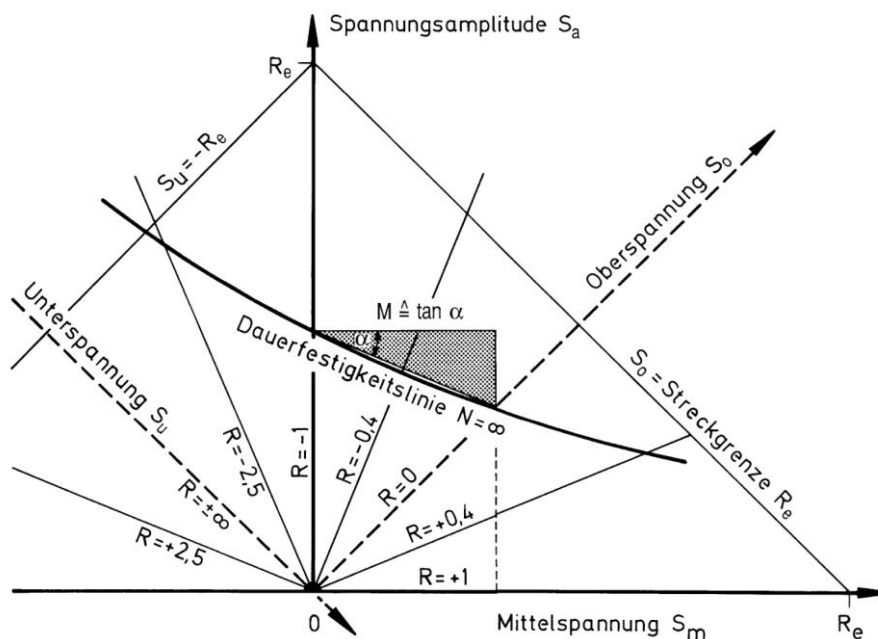


Bild 2-18: Haigh-Diagramm [31]

Figure 2-18: Haigh-diagram [31]

Das Haigh-Diagramm lässt sich problemlos um zusätzliche Zeitfestigkeitslinien (Bild 2-19) erweitern, welche jeweils einen bestimmten Zeitfestigkeitshorizont ($N = \textit{konstant}$) darstellen. Das Haigh-Diagramm bietet daher die Möglichkeit alle Informationen aus Wöhlerversuchen mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen in einem Diagramm darzustellen. Die Mittelspannungsempfindlichkeit in Abhängigkeit des Zeitfestigkeitshorizonts nach Gleichung (2-33) kann abgebildet werden.

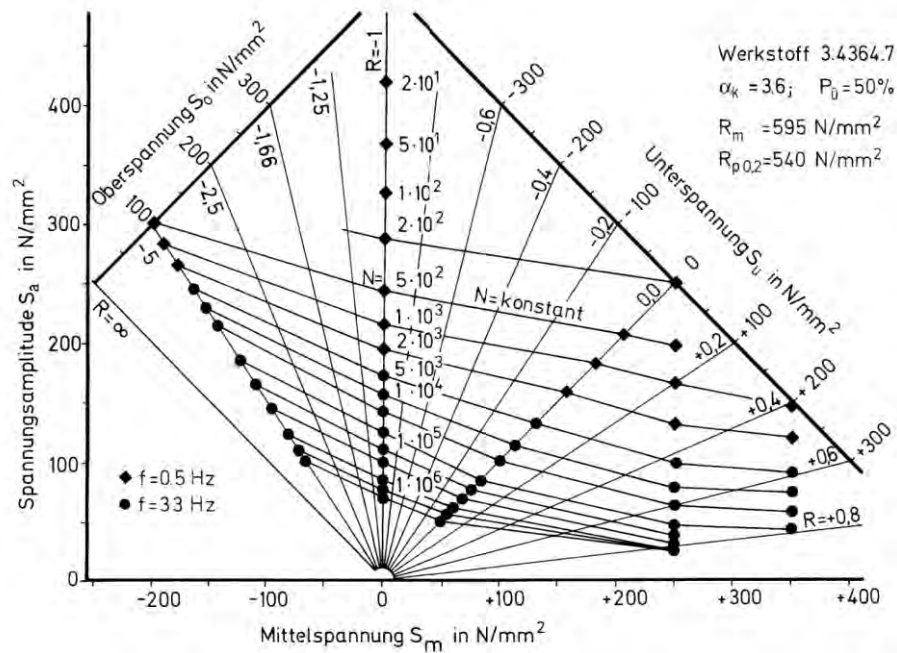


Bild 2-19: Dauer- und Zeitfestigkeits-Schaubild für Kerbstäbe aus der Aluminium-Legierung 3.4364.7 [30]

Figure 2-19: Fatigue strength diagram (infinite and finite life) for notched bars of aluminum alloy 3.4364.7 [30]

2.4.1.1 Nichtgeschweißte Bauteile

Non welded components

Für nichtgeschweißte Bauteile wird grundsätzlich eine Mittelspannungsabhängigkeit bei Ermüdungsbeanspruchung angenommen. Diese wird gegenwärtig bei der Bemessung in Abhängigkeit der verschiedenen Normen unterschiedlich berücksichtigt. So unterscheidet bspw. die FKM-Richtlinie [17] bei der Wahl der Mittelspannungsempfindlichkeit zwischen Normal- und Schubbeanspruchung. Während die Mittelspannung unter Schubbeanspruchung ausschließlich auf Grundlage der Werkstoffgruppe (Stahl, Grauguss, Aluminium, usw.) gewählt wird, so wird unter Normalbeanspruchung zusätzlich die Werkstofffestigkeit berücksichtigt.

Nach DIN EN 1993-1-9 [1] kann bei nichtgeschweißten oder spannungsarm geglähten Bauteilen die Mittelspannungsabhängigkeit indirekt über eine Modifikation des Druckspannungsanteils der Spannungsschwingbreite berücksichtigt werden. So darf bei diesen Bauteilen der Druckspannungsanteil der Spannungsschwingbreite um 40 % abgemindert werden. Der Zugspannungsanteil muss beim Ermüdungsnachweis voll angesetzt werden, siehe auch Abschnitt 2.3.

2.4.1.2 Geschweißte Bauteile

Welded components

Bei geschweißten Bauteilen treten aufgrund der lokalen, inhomogenen Wärmeeinbringung örtlich begrenzte plastische Dehnungen auf, welche zu Schweißverzug und Schweißzugspannungen führen. Die Eigenspannungen stehen im Bauteil im Gleichgewicht und überlagern sich mit den infolge äußerer Lasten induzierten Spannungen. Die Eigenspannungen können daher auf ähnlicher Weise wie Spannungen infolge äußerer Lasten interpretiert werden.

Konservativ kann bei geschweißten Bauteilen an den ermüdungsversagensrelevanten Schweißnahtkerben von Eigenspannungen in Höhe der Streckgrenze ausgegangen werden. Unter der Annahme eines duktilen, ideal-plastischen Werkstoffverhaltens kann dann unabhängig der äußeren Lasten von Oberspannungen auf dem Niveau der Streckgrenze ausgegangen werden. Betrachtet man nur die äußeren Lasten, dann liegt eine Mittelspannungsunabhängigkeit ($M = 0,0$) vor.

Die DIN EN 1993-1-9 [1] folgt diesem Ansatz und berücksichtigt für geschweißte Bauteile keinen Mittelspannungseinfluss. Die mittelspannungsunabhängige Bemessung der geschweißten Bauteile erfolgt alleine auf Grundlage der Spannungsschwingbreite. Dagegen ist bspw. nach den IIW-Empfehlungen [16] oder der FKM-Richtlinie [17] eine Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses bei geschweißten Bauteilen grundsätzlich möglich. Jedoch müssen hierzu die Eigenspannungen i. d. R. abgeschätzt werden, da komplizierte Eigenspannungsmessungen am realen Bauteil bisher auf wissenschaftliche Anwendungsbereich beschränkt sind. Nach FKM-Richtlinie [17] muss die Höhe der Eigenspannungen in die Kategorien hoch, mäßig und gering eingestuft werden. Trotz Hilfestellungen und einzelner Anwendungsbeispiele lässt diese Einstufung einen gewissen Interpretationsspielraum zu. Der Kategorie „niedrige Eigenspannungen“ (bis ca. 20 % der Streckgrenze) werden nur nach dem Schweißen spannungsarmgeglühte Bauteile und Bauteile, welche nachweislich frei von Eigenspannungen sind, zugeordnet. Der Kategorie „mäßige Eigenspannungen“ werden nur Bauteile mit begrenzten Bauteildicken und begrenztem Schweißnahtvolumen, wie bspw. quer beanspruchte Schweißnähte an Bauteildicken bis 10 mm, zugeordnet. Komplex, ausgeprägt mehrachsig belastete, dickwandige Bauteile werden der Kategorie „hohe Eigenspannungen“ zugeordnet. Dies gilt auch für Bauteile, welche sich keiner anderen Kategorie zuordnen lassen. Für hohe Eigenspannungen ist auch nach FKM-Richtlinie die Mittelspannungsempfindlichkeit sowohl für Normal- als auch für Schubspannungen mit $M = 0,0$ anzunehmen.

Bei der Durchführung von Ermüdungsversuchen, der daran angliedernden statistischen Auswertung und Kerbfallableitung sollte ein möglicher Mittelspannungseinfluss in Abhängigkeit des Konstruktionsdetails und der gewählten Probekörper stets berücksichtigt werden. Da der Probenumfang bei Ermüdungsversuchen meist begrenzt ist, hat sich für geschweißte Proben, also Probekörper mit mehr oder wenig stark ausgeprägten Eigenspannungszuständen, eine Prüfung im Zugschwellbereich mit konstantem Spannungsverhältnis $0,1 \leq R \leq 0,5$ durchgesetzt. Ein Grund hierfür ist, dass bei großer Mittelspannungsabhängigkeit die Neigungen der Zeit- und Dauerfestigkeitslinien ab diesem Bereich flacher angenommen werden kann. Eine Abweichung für noch höhere Spannungsverhältnisse ($0,5 < R < 1,0$) bei der Lebensdauerabschätzung ist gering. Insbesondere bei Kleinteilproben, welche im Anschluss an die Schweißung aus einem größeren Bauteil ausgearbeitet werden, ist auf eine Versuchsdurchführung im Zugschwellbereich zu achten. Dadurch kann ein möglicher Eigenspannungsabbau infolge der Ausarbeitung der Kleinteilproben durch die aufgebrachte Mittellast kompensiert werden. Die Lebensdauer wird so im Versuch nicht bzw. nur geringfügig überschätzt und die angegliederte Kerbfallableitung liegt nicht auf der unsicheren Seite.

2.4.2 Bauteileinfluss und Größeneffekt

Component influence and size effect

Die Begriffe „Bauteileinfluss“ und „Größeneffekt“ umfassen unterschiedliche Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit. Der Bauteileinfluss beschreibt Auswirkungen, die aus unterschiedlichen Tragstrukturen resultieren können. So unterscheidet sich beispielsweise die Versagenscharakteristik einer halbhohen Quersteife im Biegeträger von einer Quersteife auf einem rein axial beanspruchten Flachstahl, vgl. Kapitel 6.4.7 und 6.4.8. Ursächlich für mögliche Bauteileinflüsse können sowohl unterschiedliche Beanspruchungsarten als auch fertigungsbedingte Einflüsse, wie beispielsweise behinderter Verzug und daraus resultierende Eigenspannungen, sein.

Der Größeneffekt ist auch ein Überbegriff für den spannungsmechanischen, den technologischen, sowie den statistischen Größeneinfluss. Der spannungsmechanische Größeneinfluss hat insbesondere mit dem sogenannten Stützeffekt zu tun, der bei Spannungsgradienten eine Rolle spielt. Der statistische Größeneffekt beruht auf der Annahme, dass mit wachsenden geometrischen Dimensionen auch die Wahrscheinlichkeit einer zum Ermüdungsriss führenden Unregelmäßigkeit besteht. Der technologische Größeneinfluss überschneidet sich mit dem Bauteileinfluss. Er beschreibt den aus mechanischen und thermischen Herstellungsverfahren resultierenden Einfluss für Bauteile unterschiedlicher Größe [32].

Erstmals wurde der Blechdickeneffekt für geschweißte Bauteile von Gurney [33] um 1979 mithilfe numerischer bruchmechanischer Modelle untersucht. In späteren darauf aufbauenden experimentellen Untersuchungen an Quersteifen [34] (1991) wurde ein deutlicher Blechdickeneinfluss an experimentellen Versuchskörpern beobachtet. Die in (2-34) gegebene Formel wird in [34] für die Berücksichtigung des Einflusses empfohlen. Die Formel basiert dabei auf den Ergebnissen eines bruchmechanischen Modells, dass durch experimentelle Untersuchungen bestätigt wurde [35].

$$k_s = \left(t_{ref}/t \right)^k \quad (2-34)$$

Da die Formel mithilfe bruchmechanischer Ansätze bestimmt wurde, bildet sie nur einen rein spannungsmechanischen Größeneinfluss ab. Mithilfe numerischer Ansätze, wie dem Kerbspannungskonzept, lässt sich der Einfluss gut nachvollziehen.

In der Vielzahl unterschiedlicher experimenteller Untersuchungen, beispielsweise am Konstruktionsdetail Stumpfstoß, lässt sich der Blechdickeneinfluss dagegen nicht als signifikanter Parameter nachweisen, vgl. Kapitel 9.2.4.1. Jedoch wurde im Laufe des hier vorgestellten Forschungsprojekts festgestellt, dass experimentelle Daten für den relevanten Dickblechbereich nicht bekannt sind.

Der Einfluss der Blechdicke auf die Ermüdungsfestigkeit wird sowohl in DIN EN 1993-1-9 [1] als auch in den IIW-Empfehlungen [16] berücksichtigt, vgl. Kapitel 2.3. In den IIW-Empfehlungen [16] wird dabei auf Grundlage von [36] der Blechdickeneinfluss in Zusammenhang mit der Kerbschärfe gebracht. So wird für kerbfrei bearbeitete Kerbfälle ein reduzierter Blechdickeneinfluss angenommen.

2.4.3 Einfluss der Materialfestigkeit

Material influence

Bei der Bewertung des Einflusses der Materialfestigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit muss grundsätzlich zwischen geschweißten und nicht geschweißten Konstruktionen unterschieden werden.

DIN EN 1993-1-9 [1] unterscheidet Kerbfälle generell im Hinblick auf die Festigkeit der verwendeten Materialien nicht.

In geschweißten Konstruktionen ist meist die aus der Schweißnaht resultierende geometrische Kerbe maßgebend, sodass die Festigkeit des Grundmaterials in der Regel keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Dieser Zusammenhang wurde in zahlreichen Untersuchungen dokumentiert.

Experimentelle Untersuchungen von Minner und Seeger bestätigen beispielsweise, dass die Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes auf die Ermüdungsfestigkeit keinen Einfluss hat [37]. Zu sehr ähnlichen Ergebnissen kommen die experimentellen Untersuchungen in [38], [39] und [40].

Hinsichtlich der Festigkeit des Schweißzusatzwerkstoffes ist ein Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit nicht vollständig geklärt. Untersuchungen in [41], [42], [43], [44] und [45] weisen darauf hin, dass der Schweißzusatzwerkstoff einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Dieser steht nach derzeitigen Erkenntnissen jedoch nicht in direktem Zusammenhang mit der Materialfestigkeit.

In unterschiedlichen experimentellen Untersuchungen stellte Gurney fest, dass weder das Material, noch das Schweißen mit unterschiedlichen Elektroden einen Unterschied in der Ermüdungsfestigkeit ergaben [46].

Ein größerer Teil der für dieses Projekt ausgewerteten Versuche zeigt, dass die Ermüdungsfestigkeit bei geschweißten Konstruktionen nicht von der Festigkeit des Basismaterials beeinflusst wird. Dies wird auch in den statistischen Auswertungen in Kapitel 9.4 bestätigt.

Sowohl für die statistische Auswertung der Versuchsdaten in Kapitel 6 als auch für die Kerbfallempfehlungen in Kapitel 10 werden keine Unterteilungen hinsichtlich der Materialfestigkeit von geschweißten Konstruktionen vorgenommen.

3 Statistische Bewertung von Ermüdungsversuchen

Kurzfassung

Ermüdungsversuche, insbesondere an geschweißten Stahlkonstruktionen, können zum Teil erhebliche Streuungen aufweisen. Infolge von mehreren voneinander unabhängigen Einflüssen, wie metallurgischen Unterschieden, geometrischen Toleranzen, unterschiedlichen Bauteilmaßstäben, Eigenspannungen, verschiedenen Schweißverfahren oder kleinen Schweißnahtunregelmäßigkeiten oder unterschiedlichen Versagensarten, weisen entsprechende Versuchsdaten eine zufällige Streuung auf. Für die Herleitung eines charakteristischen Bemessungswerts sowie für die Bewertung von Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit muss diese Streuung berücksichtigt werden. In diesem Kapitel werden die für die Auswertung der experimentellen Daten genutzten statistischen Methoden erläutert.

Abstract

Fatigue tests, especially on welded steel structures, can show considerable scatter in some cases. As a result of several independent influences such as metallurgical differences, geometric tolerances, different component scales, residual stresses, different welding methods or small weld seam irregularities, corresponding test data show a random scatter. For the derivation of a characteristic design value as well as for the evaluation of factors influencing fatigue strength, this scatter must be taken into account. In this chapter the statistical methods used for the evaluation of the experimental data are explained.

3.1 Widerstandmodell

Resistance function

Für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit muss ein Zusammenhang zwischen der Spannungsschwingbreite S und der Anzahl der Schwingspiele bis zum Versagen N hergestellt werden. Nach einem Model von Basquin [47] kann dieser Zusammenhang für den Zeitfestigkeitsbereich mithilfe einer Exponentialfunktion angenähert werden, vgl. Gleichung (3-1):

$$N = a \cdot S^{-m} \quad (3-1)$$

Bei einer doppelt logarithmischen Darstellung kann ein linearer Zusammenhang dargestellt werden, die sogenannte Wöhlerlinie: vgl. Bild 3-1 und Gleichung (3-2):

$$\log N = \log a - m \cdot \log S \quad (3-2)$$

Der Parameter a beschreibt dabei den Schnittpunkt der Wöhlerlinie mit der Abszisse bei $S = 10^0 = 1$. Der Parameter m beschreibt die inverse Neigung der Wöhlerlinie.

Um den log-linearen Zusammenhang zwischen der Spannungsschwingbreite S und der Anzahl der Schwingspiele bis zum Versagen N zu bestimmen, müssen die unbekannt Parameter \hat{a} und \hat{m} aus der Stichprobe geschätzt werden.

3.2 Lineare Regression

Linear regression analysis

Eine Möglichkeit, die unbekannt Parameter aus der Stichprobe zu schätzen, ist die lineare Regression. Kann für die Stichprobe eine logarithmische Normalverteilung angenommen werden (vgl. Kapitel 3.3), ist eine Schätzung mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate möglich [48]. Die Parameter \hat{a} und \hat{m} können entsprechend der Gleichung (3-3) bzw. (3-11) ermittelt werden. Der Zirkumflex über der Parameterbezeichnung zeigt an, dass der entsprechende Wert aus der Stichprobe geschätzt wird:

$$\hat{m} = - \frac{n \cdot \sum (\log S_i \cdot \log N_i) - \sum \log S_i \cdot \sum \log N_i}{n \cdot \sum (\log S_i)^2 - (\sum \log S_i)^2} \quad (3-3)$$

$$\log \hat{a} = \frac{1}{n} \cdot \left(\sum \log N_i + \hat{m} \cdot \sum \log S_i \right) \quad (3-4)$$

Wobei n die Anzahl der Versuche und der Index i die Laufvariable des einzelnen Wöhlerversuchs beschreibt.

Mithilfe der bekannten Parameter kann die Funktion der Wöhlerlinie (vgl. Formel (3-2)) aufgestellt werden.

Die aus der Methode der kleinsten Quadrate ermittelte Ausgleichsgerade kann als Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit bzw. als Wöhlerlinie mit 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit betrachtet werden. Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in Bild 3-1 gegeben.

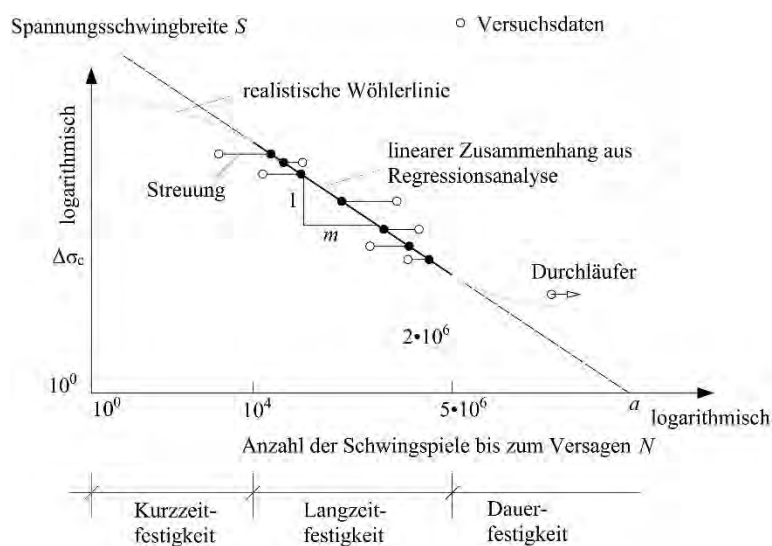


Bild 3-1: Darstellung von Ermüdungsdaten einer Serie in Abhängigkeit der Spannungsschwingbreite

Figure 3-1: Illustration of fatigue data of one series as a function of the stress range

Für alle statistischen Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit wurde die Neigung m der Wöhlerlinie als bekannt vorausgesetzt. Für geschweißte, kerbscharfe Konstruktionsdetails ist die Annahme $m = 3$ durch viele experimentelle Untersuchungen belegt [49]. Für einige Konstruktionsdetails unter Schub wird entsprechend DIN EN 1993-1-9 [1] die Auswertung mit $m = 5$ durchgeführt. Für einige Konstruktionsdetails ohne scharfe geometrische Kerbe ist $m = 5$ ebenfalls geeignet, vgl. Kapitel 6.3.2.

Eine Berücksichtigung des Parameters m als statistisch unsichere Variable führt nicht unbedingt zu konservativeren oder genaueren Kerbfällen [2].

Die feste Definition der Wöhlerlinienneigung erfolgt in Übereinstimmung mit den Kerbfallklassen in DIN EN 1993-1-9 [1]. Zudem ermöglicht sie einen direkten Vergleich zwischen einzelnen Kerbfällen.

Die Methode der kleinsten Quadrate ist nicht für die Berücksichtigung von sogenannten Durchläufern, also Versuchen, die das Abbruchkriterium nicht erreicht haben, geeignet.

Versuche, die kein Versagen zeigen oder das Abbruchkriterium nicht erreichen, werden bei der Auswertung vernachlässigt. In Anlehnung an [9] wird zudem eine fest definierte Grenze von $5 \cdot 10^6$ Schwingspielen für den Zeitfestigkeitsbereich festgelegt. Versuche mit höheren Schwingspielzahlen werden ebenfalls vernachlässigt.

Durchläufer werden in der Statistik als zensierte Daten behandelt. Grundsätzlich ist eine statistische Auswertung unter Berücksichtigung dieser Daten möglich. Die Maximum-Likelihood-Methode ermöglicht die Schätzung von Parametern für beliebige Verteilungsfunktionen auch in Zusammenhang mit zensierten Daten.

Entsprechende Ansätze sind unter anderem in [50] und [51] gegeben.

3.3 Verteilungsfunktion Distribution function

Für die Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit wird in Übereinstimmung mit Eurocode 0 [52] angenommen, dass die Grundgesamtheit der entsprechend ausgewerteten Konstruktionsdetails einer logarithmischen Normalverteilung folgt.

Eine entsprechende Verteilungsfunktion lässt sich mithilfe der Standardabweichung s sowie eines Mittelwerts bestimmen. Als Mittelwert wird die mithilfe der linearen Regression geschätzte mittlere Wöhlerlinie angesetzt.

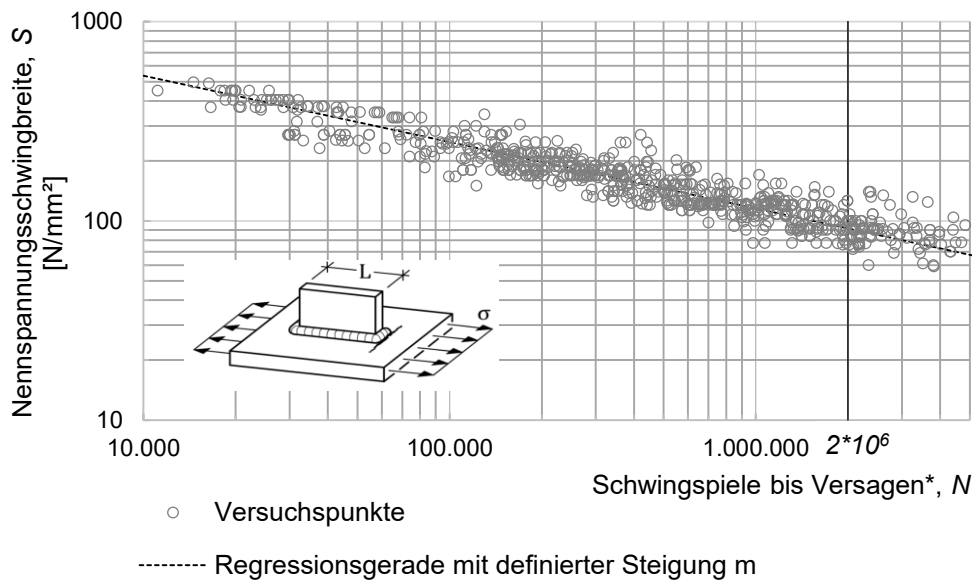
Die resultierende Standardabweichung s (vgl. Bild 3-1) kann mit Formel (3-5) berechnet werden. Die Neigung m wird dabei als bekannt vorausgesetzt.

$$s = \sqrt{\frac{\sum [\log N_i - (\log \hat{a} - m * \log S_i)]^2}{n - 1}} \quad (3-5)$$

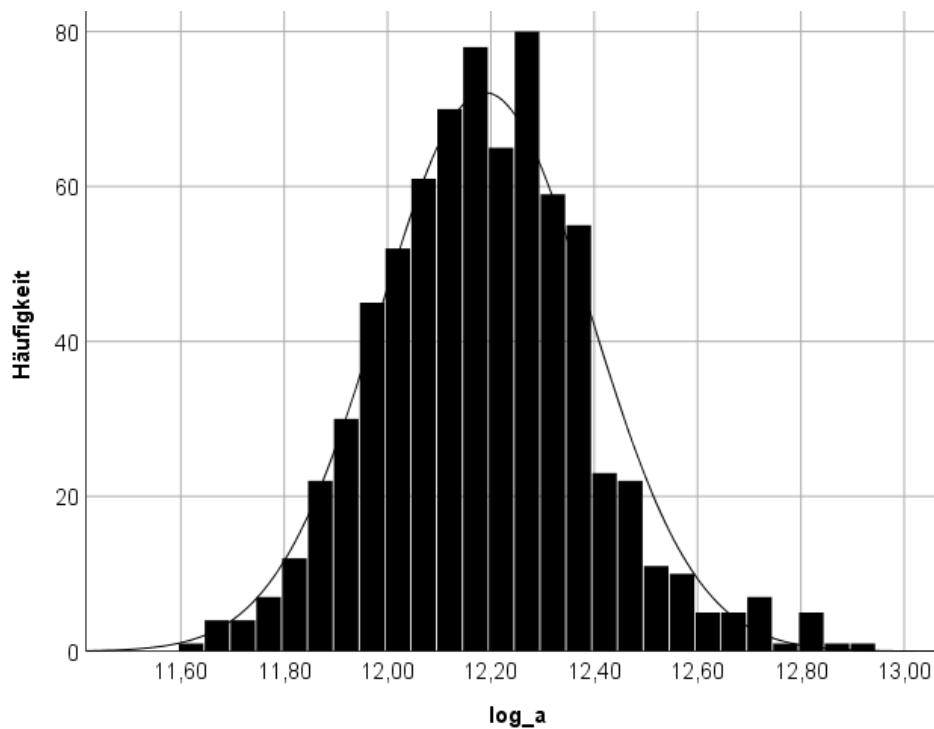
Dabei ist $n-1$ der Freiheitsgrad für den Fall, dass der Parameter m aus Vorversuchen bekannt ist.

Der Freiheitsgrad ermittelt sich aus der Anzahl der zur Verfügung stehenden Versuche n abzüglich der Anzahl der Parameter die aus der Stichprobe geschätzt werden sollen.

Die Annahme, dass die Grundgesamtheit einzelner Konstruktionsdetails einer logarithmischen Normalverteilung folgt, lässt sich an Konstruktionsdetails, zu denen eine große Datenbasis vorhanden ist, bestätigen. In Bild 3-2 (a) sind die für die Ableitung eines charakteristischen Kerbfalls genutzten experimentellen Daten am Konstruktionsdetail Längssteife dargestellt. In Bild 3-2 (b) ist ein Histogramm der Messwerte bezogen auf Parameter $\log a$ dargestellt. Die Darstellung veranschaulicht, dass die logarithmierten Werte einer Normalverteilung sehr nahe kommen.



(a)



(b)

Bild 3-2: Versuche am Konstruktionsdetail Längssteife (a) und Verteilung der Ergebnisse bezogen auf $\log a$ (b)

Figure 3-2: Test results on longitudinal stiffeners (a) and distribution of the data based on $\log a$ (b)

3.4 Ermittlung charakteristischer Wöhlerlinien

Evaluation of characteristic S-N curves

Für die Ermittlung charakteristischer Ermüdungsfestigkeiten mit 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit wird ein sogenanntes Prognoseintervall genutzt.

Das Prognoseintervall berücksichtigt mithilfe der Student t Verteilung die Unsicherheit, die aus der Größe der Stichprobe resultiert. Die t Verteilung berücksichtigt, dass die Stich-

probe einer normalverteilten Grundgesamtheit t -verteilt ist. Die t Werte hängen vom Signifikanzniveau α und der Stichprobengröße n ab. Die tabellierten t Werte können z.B. aus [53] entnommen werden. Mithilfe des Prognoseintervalls kann der Wert k_n ermittelt werden, vgl. Gleichung (3-6):

$$k_n = t_{1-\alpha, n-1} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (3-6)$$

Entsprechende k_n Werte können auch direkt aus Tabelle D.1 in Eurocode 0 Anhang D [52] entnommen werden, vgl. Tabelle 3-1. Eurocode 0 nutzt demnach ebenfalls das Prognoseintervall, siehe auch [54].

Tabelle 3-1: k_n Faktor für charakteristische Werte mit 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit (Auszug aus Eurocode 0 [52])

Table 3-1: k_n factor for characteristic values with 95 % survival probability (extract from Eurocode 0 [52])

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x bekannt	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V_x unbekannt	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Wenn die Standardabweichung (bzw. der Variationskoeffizient) aus der Stichprobe geschätzt wird (vgl. Gleichung (3-5)), sollte die Zeile mit „ V_x unbekannt“ gewählt werden. Obwohl nach Eurocode 0 [52] eine statistische Auswertung mit unbekannter Standardabweichung bereits ab drei Versuchskörpern möglich ist, wird empfohlen, dass die Stichprobe aus mindestens zehn Versuchsergebnissen bestehen sollte. Um für ein Konstruktionsdetail einen normativen Kerbfall abzuleiten, der möglichst alle zur Streuung beitragenden Einflussgrößen in der Stichprobe beinhaltet, sind in der Regel aber noch deutlich mehr Versuche erforderlich.

Mithilfe des aus der Stichprobe geschätzten Parameters $\log a$ (Gleichung (3-4)), der Standardabweichung s aus Gleichung (3-5) und dem k_n Faktor aus Gleichung (3-6) oder Tabelle 3-1 kann ein charakteristischer Wert $\log a_k$ für die Wöhlerlinie abgeleitet werden, vgl. Formel (3-7).

$$\log a_k = \log \hat{a} - k_{1-\alpha, p, n} * s \quad (3-7)$$

Der Parameter $\log a_k$ beschreibt den Schnittpunkt der charakteristischen Wöhlerlinie mit der Abszisse bei $S = 10^0 = 1$. Das Vorgehen ist schematisch in Bild 3-3 dargestellt.

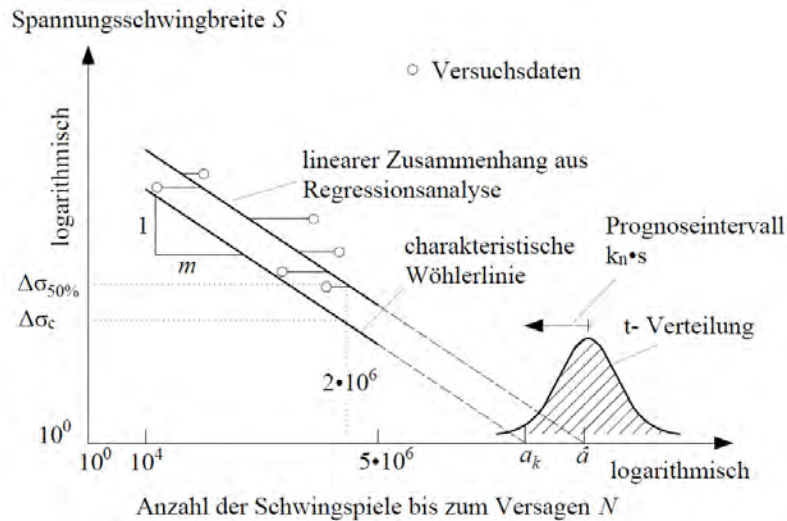


Bild 3-3: Schematisches Vorgehen zur statistischen Auswertung einer Datenmenge für die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit

Figure 3-3: Schematic procedure for statistical evaluation of a data set for the determination of fatigue strength

Der Kerbfall lässt sich berechnen, indem mithilfe der umgestellten Gleichung (3-2) die Spannungsschwingbreite der charakteristischen Wöhlerlinie bei 2 Millionen Schwingspielen bestimmt wird, vgl. Gleichungen (3-8) und (3-12).

$$\log S_c = \frac{\log(2 \cdot 10^6) - \log a_k}{m} \quad (3-8)$$

$$\Delta \sigma_c = 10^{\log S_c} \quad (3-9)$$

Das dargestellte Verfahren hat sich im Rahmen des Projekts für die Auswertung großer Datenmengen bewährt. Die abgeleiteten charakteristischen Wöhlerlinien in Kapitel 6 begrenzen die streuenden Versuchspunkte zuverlässig, vgl. beispielsweise Bild 6-56 oder Bild 6-83.

Alternative Methoden zur Herleitung charakteristischer Wöhlerlinien, beispielsweise mit dem Toleranzintervall, sind in [55] gegeben.

3.5 Rechenbeispiel

Worked example

Im Folgenden sind die Versuchsergebnisse von zehn Wöhlerversuchen an einem Konstruktionsdetail gegeben. Der Datensatz ist identisch mit dem Rechenbeispiel im Background Dokument 9.01 [9]. In [9] wird die Neigung m als Parameter mit statistischer Unsicherheit betrachtet. Im unten gegebenen Beispiel wird die Neigung der Wöhlerlinie dagegen als bekannt vorausgesetzt. Es handelt sich um ein geschweißtes Detail, daher wird die Neigung zu $m = 3$ festgelegt.

Tabelle 3-2: Datensatz für statistische Auswertung

Table 3-2: Data set for statistical analysis

i	S_i	N_i	$\log S_i$	$\log N_i$
[-]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]
1	265	42.000	2,423	4,623
2	265	70.000	2,423	4,845
3	265	79.000	2,423	4,881
4	202	107.000	2,305	5,029
5	202	188.000	2,305	5,274
6	202	204.000	2,305	5,310
7	139	537.000	2,143	5,730
8	139	597.000	2,143	5,776
9	108	800.000	2,033	5,903
10	108	1.077.000	2,033	6,032
Σ			22,539	53,420

Zunächst wird der theoretische Schnittpunkt $\log \hat{a}$ der Zeitfestigkeitsgeraden mit der Abszisse berechnet, Gleichung (3-10):

$$\begin{aligned} \log \hat{a} &= \frac{1}{n} \cdot \left(\sum \log N_i + m \cdot \sum \log S_i \right) \\ &= \frac{1}{10} \cdot (53,420 + 3 \cdot 22,539) = 12,104 \end{aligned} \quad (3-10)$$

Mit $\log \hat{a}$ und der fest definierten Neigung $m = 3$ kann bereits die Mittelwertgerade definiert werden. Die Geradengleichung ist in Gleichung (3-11) gegeben:

$$\log \hat{N} = 12,104 - 3 \cdot \log S \quad (3-11)$$

Die Standardabweichung kann aus der Stichprobe geschätzt werden, Gleichung (3-12):

$$s = \sqrt{\frac{\sum [\log N_i - (\log \hat{a} - m \cdot \log S_i)]^2}{n-1}} = 0,1156 \quad (3-12)$$

Das Prognoseintervall zur Abschätzung der 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit ergibt sich aus der folgenden Gleichung. Der t Wert aus der Student t Verteilung kann aus gängigen Tabellenbüchern [53] entnommen werden. Berechnet wird wieder der Schnittpunkt der 95 % Geraden mit der Abszisse, Gleichung (3-13).

$$\begin{aligned} \log \hat{a} - t_{0,95,n-1} \cdot s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \\ = 12,104 - 1,833 \cdot 0,1156 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{10}} = 11,88 \end{aligned} \quad (3-13)$$

Mithilfe des charakteristischen $\log \hat{a}$ Wertes und der bekannten Neigung $m = 3$ kann die charakteristische Wöhlerlinie, wie in Gleichung (3-14) dargestellt, definiert werden. Der Kerbfall entspricht der Spannungsschwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen.

$$\log N_k = 11,88 - 3 \cdot \log S$$

$$\log S_c = \frac{\log(2 \cdot 10^6) - 11,88}{-3} = 1,86 \quad (3-14)$$

$$\Delta\sigma_c = 10^{\log S_c} = 72,4 \text{ N/mm}^2$$

Für die in Tabelle 3-2 zusammengestellten Daten kann mithilfe der statistischen Auswertung Kerbfall 72 ermittelt werden.

3.6 Bewertung signifikanter Einflussgrößen

Evaluation of significant influences

Ein Ziel des hier vorgestellten Forschungsvorhabens ist die Bewertung unterschiedlicher Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit. Beispielsweise seien hier mögliche Einflüsse aus der Mittelspannung oder der Materialfestigkeit genannt, die im Rahmen von DIN EN 1993-1-9 [1] derzeit nicht berücksichtigt werden. Aufgrund der generell präsenten Streuung der experimentellen Ergebnisse ist der Einfluss signifikanter Parameter nicht immer offensichtlich. Deshalb wurden unterschiedliche Ansätze zur Bewertung potenziell signifikanter Einflussgrößen untersucht.

Die einfachste Möglichkeit ist die Gruppenbildung von experimentellen Ergebnissen. Wenn beispielsweise der Einfluss der Streckgrenze auf ein Konstruktionsdetail untersucht wird, werden alle Versuchsergebnisse an normalfesten Stählen und hochfesten Stählen in getrennten Gruppen ausgewertet und anschließend gegenübergestellt. Da der charakteristische Kerbfall sowohl vom Mittelwert als auch von der Streuung der Stichprobe und der Anzahl der Versuche abhängt, ist hier ein Hypothesentest, wie beispielsweise der Zweistichproben t-Test, hilfreich. Damit kann beispielsweise bewertet werden, ob der Einfluss der Streckgrenze signifikant ist.

Eine vereinfachte Möglichkeit signifikante Einflussgrößen zu untersuchen, ist der Vergleich normierter Versuchswerte. Dabei wird, wie bei der in 3.2 beschriebenen statistischen Auswertung, die Neigung der Wöhlerlinie als bekannt vorausgesetzt. Entlang der bekannten Wöhlerlinienneigung werden alle Versuchsdaten auf den Bezugswert bei 2 Millionen Schwingspielen abgebildet. Die normierten Versuchsdaten können auch vereinfacht als Streuband dargestellt werden. Dieses Vorgehen ist schematisch in Bild 3-4 dargestellt.

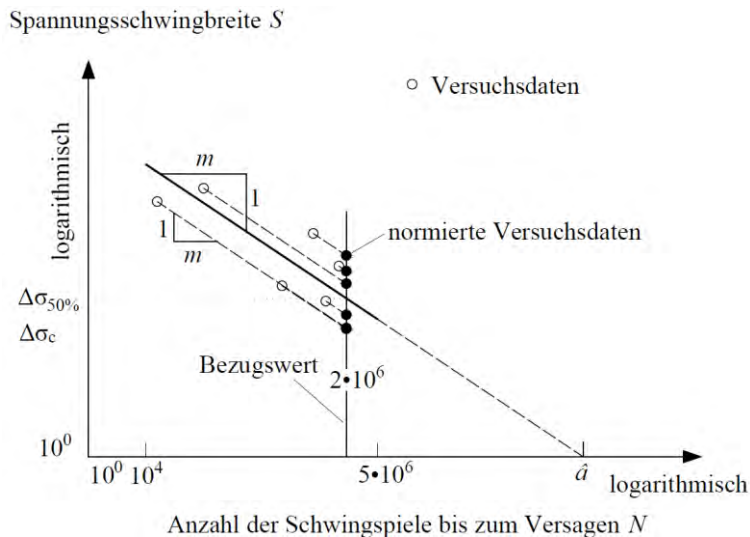


Bild 3-4: Normierte Streubänder in Abhängigkeit der Streckgrenze für das Konstruktionsdetail Längssteife (Versuchsdaten bezogen auf 2 Millionen Schwingspiele)

Figure 3-4: Normalised scatter bands as a function of the yield stress for test data on longitudinal attachment (test data normalised to 2 million cycles)

Die Bezugswerte können im nächsten Schritt in einen Zusammenhang mit einer potenziellen Einflussgröße gesetzt werden. Dabei ist ein Einfluss auch optisch gut zu identifizieren. In Kapitel 9 werden verschiedene Einflüsse untersucht.

Die auf 2 Millionen Schwingspiele bezogenen Versuchswerte können direkt mit dem entsprechenden Kerbfall verglichen werden. Liegt eine signifikante Einflussgröße vor, muss ein Trend erkennbar sein.

Um mit den skalierten Versuchswerten arbeiten zu können, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Zum einen dürfen die Daten nicht durch weitere signifikante Parameter beeinflusst werden. So bietet es sich zum Beispiel an, nur Daten zu vergleichen, die unter einem vergleichbaren Spannungsverhältnis R generiert wurden, da beispielsweise Druckschwellbeanspruchungen einen positiven Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben können. Zum anderen muss die angenommene Wöhlerlinienneigung für alle Versuchswerte konstant sein. Schweißnahtnachbehandlungen können beispielsweise zu abweichenden Wöhlerlinienneigungen führen.

4 Datenbank für Ermüdungsversuche

Database for fatigue tests

Kurzfassung

Zur interaktiven Speicherung, Eingabe, Abfrage, Suche, Auswertung und Veränderung von Ermüdungsversuchsdaten wurde eine innovative Datenbank erstellt. Im Rahmen einer detaillierten Struktur beinhaltet die Datenbank alle für die Ermüdungsfestigkeit relevanten Informationen. Mit MySQL (Version 5.7) wurde ein plattformunabhängiges, universell einsetzbares und sowohl Multi-User als auch Multi-Tasking fähiges Datenbankverwaltungssystem gewählt. Die Datenbankanwendung erfolgt online über eine im Rahmen des Projektes geschriebene, passwortgeschützte Website, die ein interaktives Arbeiten mit den Versuchsdaten ermöglicht.

Abstract

An innovative database has been created for the interactive saving, input, query, search, evaluation and modification of fatigue test data. Within the framework of a detailed structure, the database contains all information relevant to fatigue strength. With MySQL (version 5.7) a platform-independent, universally usable and multi-user capable as well as multi-tasking capable database management system was chosen. The database is applied online via a password-protected website written within the framework of the project, which enables interactive working with the experimental data.

4.1 Struktur

Structure

4.1.1 Einführung

Introduction

Zur Neubewertung von Kerbfallklassen anhand von Versuchsdaten wurde eine Datenbank für Ermüdungsversuche erstellt. Um eine feingliedrige Übersicht der Informationen einer Versuchsserie zu gewährleisten, wurde eine flexible Datenbankstruktur entwickelt, die im Folgenden näher erläutert wird.

4.1.2 Hierarchie der Datenbankstruktur

Hierarchy of the database structure

Von der Durchführung eines Ermüdungsversuchs bis hin zur Bestimmung der zugehörigen Kerbfallklasse sind im Rahmen der im Projekt erarbeiteten Datenbankstruktur einige Dokumentationsschritte notwendig, die sich in eine Hierarchie gliedern lassen, siehe Bild 4-1.

Im Mittelpunkt der Datenbankstruktur steht das Hierarchieelement „Ermüdungsversuchsserie“, das alle Informationen rund um die Ermüdungsversuche enthält. Die Informationsstruktur einer Serie ist in weitere „Informationskategorien“ gegliedert, die in Abschnitt 4.1.3

näher erläutert werden. Eine Versuchsserie der Datenbank muss stets veröffentlicht worden sein, sodass ihr eine „Quelle“ zuzuordnen ist, in der jegliche in die Datenbank eingetragenen Informationen dokumentiert sein müssen. Weiterhin ist in der Struktur erwartungsgemäß vorgesehen, dass eine Versuchsserie ein oder mehrere „Versuchsergebnisse“ enthält. Wenn Informationen zur „bisherigen statistischen Auswertung“ der Versuche einer Serie vorhanden sind [4], wurden diese zu Vergleichszwecken ebenfalls mit in die Datenbank aufgenommen. Zusätzlich soll jede in der Datenbank enthaltene Versuchsserie einem bestimmten „Kerbdetail“ zugehörig sein. Unter Einbezug von Versuchsergebnissen bestenfalls mehrerer Serien eines Kerbdetails kann im Rahmen der Datenbankanwendung (siehe Abschnitt 4.3) die statistische Analyse (siehe Kapitel 3) zur Ableitung der Kerbfallklasse erfolgen.

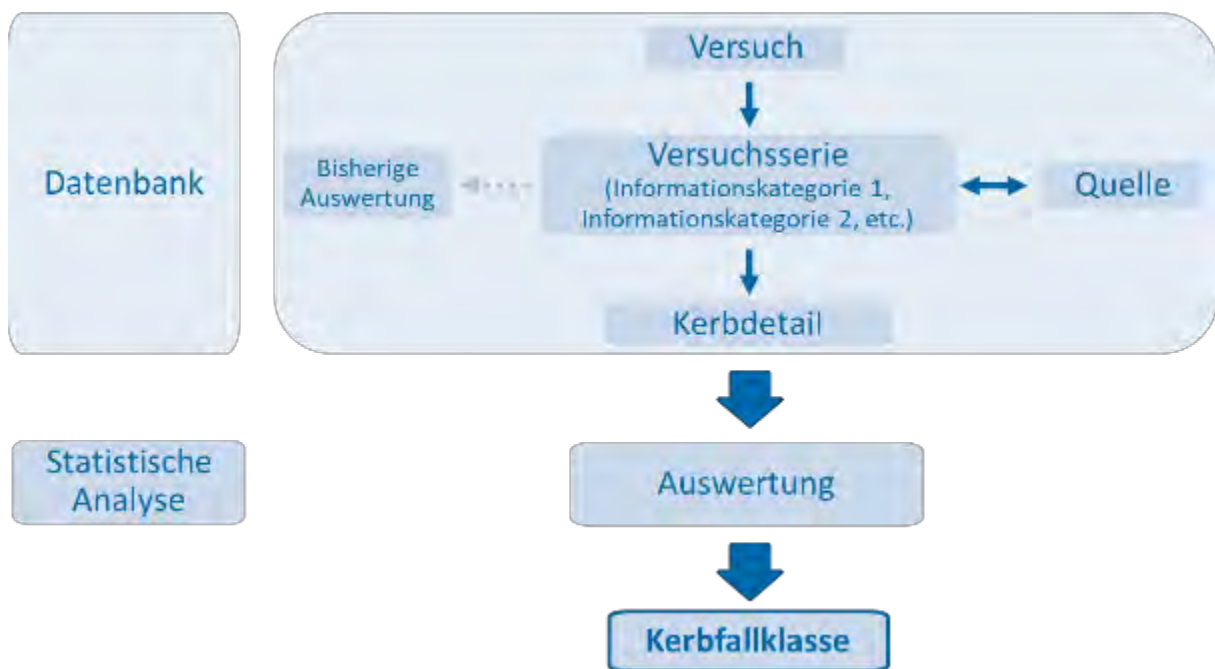


Bild 4-1: Hierarchie der Datenbankstruktur

Figure 4-1: Hierarchy of the database structure

Gemäß der Hierarchie wurde eine Datenbankstruktur mit verschiedenen Elementen des Verwaltungssystems MySQL (Version 5.7) erstellt, auf welche in Abschnitt 4.2 konkret eingegangen wird.

4.1.3 Integrierte Informationen

Embedded Information

Neben der Erstellung einer geordneten Datenbankstruktur bestand das Hauptziel bei der Entwicklung der Datenbank in der Aufnahme möglichst vieler hinsichtlich Ermüdungsfestigkeit relevanter Informationen, siehe Tabelle 4-1. Um eine möglichst große Reichweite der Datenbank zu ermöglichen, wurden sowohl die Struktur als auch die eingetragenen Informationen in englischer Sprache verfasst. Die zu dokumentierenden Informationen einer Versuchsserie wurden für ein Importschema der Übersichtlichkeit halber in Kategorien eingeteilt, die ebenfalls Tabelle 4-1 zu entnehmen sind.

Das Importschema beinhaltet insgesamt 138 ausfüllbare Felder in sieben Kategorien, die im Folgenden vorgestellt werden.

Zunächst werden „allgemeine Informationen“ zu einer Serie eingetragen. Wenn eine Serie Unterserien beinhaltet, werden sowohl Seriename und Name der Unterserie eingetragen. In einem weiteren Feld kann das Konstruktionsdetail mit Worten beschrieben werden. Des Weiteren kann zwischen zwei Maßstabsoptionen gewählt werden: Groß- oder Kleinteilversuche. Zudem müssen eine oder ggf. mehrere Quellen IDs angegeben werden. Hierzu wurde in einer separaten Tabelle für jede vorhandene Quelle eine ID angelegt und die Quelle zitiert. Schließlich können in einem weiteren Feld allgemeine Kommentare zur Serie gemacht werden und es muss vermerkt werden, ob die Serie im Hintergrunddokument [4] bereits aufgeführt wurde oder ob es sich um eine neue Serie handelt.

In der Kategorie „Belastung“ kann die Art der Beanspruchung, z.B. Biegung oder Zug, vermerkt werden. Außerdem muss bejaht oder verneint werden, ob es sich bei der Beanspruchung um konstante Spannungsschwingbereiten handelt. Falls bekannt, kann die Frequenz oder ein Frequenzbereich der Prüfmaschine bei der Versuchsdurchführung eingetragen werden. Schließlich muss noch der Ort der berechneten Spannungsschwingbreite der Versuchsserie aufgenommen werden. Dieser spielt eine zentrale Rolle bei der Auswertung für das Nennspannungskonzept, da die Spannungen im Querschnitt des Prüfkörpers u.U. nicht konstant sind.

Tabelle 4-1: Enthaltene Informationen einer Serie, je nach Informationskategorie

Table 4-1: Information of a series, depending on the information category

Informationskategorie	Enthaltene Felder
General	Name of series, name of subseries, description of component, scale, source ID, remarks, if series is part of [4]
Loading	Kind of loading, if stress range is constant, frequency, location of calculated stress range
Material	steel grade, yield strength, tensile strength
Weld	Weld shape, weld symbol acc. to [56], number of passes, welding process acc. to [57], pretreatment, post treatment, welding sequence, if weld is continuous, filler material, yield strength of filler, tensile strength of filler, quality level acc. to [19], welding position acc. to [58], remarks
Environment	Temperature, humidity, corrosive conditions, radioactive conditions
Previous evaluation	Number of evaluated test results, fatigue strength of 50% and 95% probability of survival, both with variable gradients m^* , gradients of $m = 3$ and $m = 5$, acc. to [1] and [6]
Detail specific properties	Imperfections, several geometrical parameters of the different details
Tests	If test information is available in tables or graphically, stress ratio, nominal stress range, cycles to rupture, if it is a run out, failure region, remarks

Die Kategorie „Material“ erlaubt dem Nutzer, für drei Teile eines Prüfkörpers die Stahlsorte, einen Wert oder Bereich der Streckgrenze und der Zugfestigkeit einzutragen.

In der ausführlichen Kategorie „Schweißnähte“ wird zunächst die Schweißnahtform angegeben. Dazu gehört das Schweißsymbol nach [56], wobei hier auch mehrere Symbole eingetragen werden können. Für maximal drei Folgen von Schweißungen können die Anzahl der Lagen und die Schweißprozesse nach [57] eingetragen werden. Für maximal 3

Querschnittsteile können Informationen zur Vorbehandlung angegeben werden. Zur Information über die Nachbehandlung stehen drei Felder zur Verfügung. Falls bekannt, wird die Schweißreihenfolge dokumentiert. Ob es sich um eine durchgehende Naht handelt, kann ebenfalls für maximal drei Schweißnahtdurchgänge angegeben werden. Außerdem kann der Schweißzusatzwerkstoff benannt und Werte oder Bereiche der Streckgrenze und der Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffs eingetragen werden. Schließlich können Bewertungsgruppe und Schweißposition nach [19] und [58] angegeben werden.

Die Kategorie „Bisherige Auswertung“ führt die Ergebnisse der statistischen Bewertung im Hintergrunddokument [4] zu Vergleichszwecken auf. Die Auswertung beinhaltet die Anzahl der berücksichtigten Proben und Ermüdungsfestigkeiten auf 50 und auf 95 prozentigem Sicherheitsniveau, ausgewertet mit variabler Steigung m^* , Steigung $m = 3$ und Steigung $m = 5$ getrennt nach DIN EN 1993-1-9 [1] und nach ENV 1993-1-1 [6].

Da jedes Detail unterschiedliche Geometrieigenschaften, wie z.B. Breite oder Durchmesser, besitzt, werden in der Kategorie „Detailspezifische Eigenschaften“ Variablen eingeführt, denen in einer separaten Tabelle Geometrieigenschaften zugeordnet werden. Auf diese Weise kann für jedes Detail das gleiche Importschema verwendet werden. Zu den Geometrieigenschaften können beispielsweise Dicke, Breite, Höhe, Flanschdicke, Flanschbreite, Durchmesser, Spannweite, Schweißnahtdicke und Spalt gehören. Zusätzlich können Informationen zu Imperfektionen gemacht werden.

Die letzte Kategorie „Versuchsergebnisse“ ist im Vergleich zu den vorherigen Kategorien anders strukturiert. Denn hier ist im Regelfall mehr als nur eine Zeile einzutragen, da zu jeder Serie mehrere Versuchsergebnisse gehören. Für jeden Versuch kann in dieser Kategorie eingetragen werden, ob die Ergebnisse tabellarisch oder nur graphisch vorliegen. Zudem kann das Spannungsverhältnis eingetragen werden. Die eigentlichen Ergebnisse jeden Versuches, Spannungsschwingbreite und Zyklen bis zum Versagen, werden daraufhin eingegeben. Dabei kann zwischen verschiedenen Versagenskriterien gewählt werden, wobei mehrere eingetragen werden können, siehe Tabelle 4-2.

Tabelle 4-2: Versagenskriterien

Table 4-2: Failure criterion

Bezeichnung	Versagenskriterium: Anzahl der Lastspiele bei
N0	einem nicht dokumentierten Kriterium
N1	15% Dehnungsänderung an der Stelle der Rissinitierung
N2	Detektion eines Risses
N3	Riss durch die Dicke
N4	komplettem Verlust der Steifigkeit
N5	einem anderen Kriterium als N1 – N4, Kriterium in Spalte „Remark“ anzugeben
N6	Feststellung eines Durchläufers

Des Weiteren muss bejaht oder verneint werden, ob es sich bei dem Versuch um einen Durchläufer handelt. Zudem kann der Versagensort angegeben werden. Dieser spielt für die Auswertung eine große Rolle, da bei einigen Details nach dem Ort des Versagens unterschieden wird (z.B. Schweißnahtwurzel oder Schweißnahtübergang). Schließlich lässt eine letzte Spalte Platz für Kommentare.

4.2 Verwaltungssystem MySQL

Management system MySQL

Bei „MySQL“ handelt es sich um eins der weltweit meist verbreiteten Datenbankverwaltungssysteme auf SQL (Structured Query Language) Basis. Eine Datenbank besteht aus einer Sammlung von Daten, die untereinander in einer logischen Beziehung stehen. Um Daten einer Computerdatenbank hinzuzufügen, auf sie zuzugreifen oder sie zu verarbeiten, wird ein Datenbankmanagementsystem (DBMS) wie der MySQL Server benötigt. Bei MySQL handelt es sich um ein relationales Datenbankmanagementsystem. Anstatt einen einzigen großen Speicherraum anzulegen, speichert ein solches System die Daten in separaten „Tabellen“ [59]. Daher ist das System in der Lage, auch große Datenmengen schnell und zuverlässig zu verarbeiten. MySQL kann als Open Source Software bezogen werden und ist plattformunabhängig, universell einsetzbar und sowohl Multi-User als auch Multi-Tasking fähig. Aus diesen Gründen eignet sich MySQL bestens für die Verwaltung der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Datenbank [59, 60, 61, 62].

MySQL arbeitet nach dem Client-Server-Prinzip. Die Datenbank stellt dabei den MySQL-Server dar. Dieser ist für die Speicherung und Verteilung der Daten zuständig. Allerdings ist innerhalb von MySQL keine eigene grafische Oberfläche definiert. Diese lässt sich aber mittels externer Programme realisieren, die eine solche grafische Schnittstelle zur Administration und Bedienung von MySQL bereitstellen. Die MySQL-Clients können über eine Software, in diesem Fall „phpMyAdmin“, eine Verbindung zu dem Server herstellen und Daten abrufen oder bearbeiten. Es können neue Datensätze eingearbeitet, geändert oder gelöscht werden. Je nach Anwendung der Datenbank ist der Zugriff über ein internes Netzwerk oder über das öffentliche Internet möglich, siehe Abschnitt 4.3 [60].

Die Datensätze befinden sich in der Datenbank in zweidimensionalen Tabellen mit beliebig vielen Zeilen und Spalten. Es kann zwischen unterschiedlichen Datentypen, wie z. B. numerischen Daten, Zeichenketten oder dem Datumsformat, unterschieden werden. Unter Abschnitt 4.1 wurden die Struktur der entwickelten Datenbank und die Hierarchieelemente bereits beschrieben. Tabelle 4-3 präsentiert die Bezeichnung und den Zweck der Tabellen der MySQL Datenbank und ihre Zuordnung zu einem Hierarchieelement der Datenbankstruktur.

Die Tabellen „Series“ und „Sources“ verfügen jeweils über eine Spalte, in der jedem neuen Datensatz eine Nummer per Autoinkrement zugewiesen wird. Dadurch verfügt jeder Datensatz über eine eindeutige ID und kann über diese in andere Tabellen eingearbeitet werden. In die Tabellen „Series“, „Sources“ und „Tests“ können über phpMyAdmin oder eine Websiteanwendung (siehe Abschnitt 4.3) neue Datensätze eingefügt werden. Die restlichen Tabellen können über phpMyAdmin bearbeitet werden, vom Nutzer der Anwendung jedoch lediglich angezeigt bzw. für informative Zwecke genutzt werden oder dienen zur besseren Verwaltung anderer Tabellen.

Tabelle 4-3: Bezeichnung und Zweck der Tabellenelemente in der MySQL Datenbank

Table 4-3: Name and purpose of the table elements in the MySQL database

Tabellenbezeichnung in der Datenbank	Hierarchie-element	Zweck
Series	Versuchsserie	In dieser Tabelle befinden sich alle eingearbeiteten Versuchsserien mit den zugehörigen Informationen (Belastung, Material, Schweißnähte, Geometrie, etc.).
Detail properties	Versuchsserie	Da jedes Detail andere Geometrie- oder andere detailspezifische Charakteristiken besitzt, werden in dieser Tabelle für jedes Detail die relevanten Eigenschaften definiert.
Sources	Quelle	In dieser Tabelle befinden sich alle eingepflegten Quellen mit den zugehörigen Informationen (Autor, Titel, Erscheinungsjahr, etc.).
Tests	Versuch	Diese Tabelle verwaltet die Versuchsergebnisse aller Serien.
Previous Evaluation	Bisherige Auswertung	In dieser Tabelle befinden sich Ergebnisse vorheriger Auswertung, falls aus [4] bekannt.
Catalogue	Hilfsmittel	In dieser Tabelle sind alle Details des Kerbfallkatalogs mit einem zugehörigen Zahlenschlüssel gespeichert, sodass diese dann in andere Tabellen eingepflegt werden können.
K-values	Hilfsmittel	Diese Tabelle beinhaltet die zur statistischen Auswertung benötigten Beiwerte, siehe Kapitel 3.

4.3 Datenbankanwendung über Website

Database application via Website

4.3.1 Allgemeines

General

Um die Daten anwendungsfreundlicher als über die Software phpMyAdmin einsehen, bearbeiten und hinzufügen zu können, wurde im Rahmen dieses Projekts eine passwortgeschützte Website geschrieben.

Die Website stellt eine optimale Schnittschnelle zwischen einem leistungsstarken Datenbankmanagementsystem und einer nutzerfreundlichen Anwendung zur Datenverwaltung dar. Sie ermöglicht es passwortgeschützt auch externen Benutzern die eingetragenen Daten einzusehen und neue Daten zur Datenbank hinzuzufügen. Die vollständige Verwaltung, vor allem das Löschen und Ändern von Datenbankeinträgen, ist weiterhin aus Sicherheitsgründen nur für die beteiligten Forschungsstellen über phpMyAdmin möglich. Die Website ist benutzerfreundlich gestaltet und es existieren Informationsseiten zu allen relevanten Themen, sodass sich das Vorgehen zur Anzeige, Suche und Auswertung von Daten intuitiv und selbsterklärend gestaltet.

Die Website wird zukünftig über die Seite des Bauforumstahls [63] erreichbar sein. Die Skripte zur Datenbankanwendung wurden in der Skriptsprache PHP beziehungsweise der Auszeichnungssprache „HTML“ geschrieben. Außerdem wurde die Darstellung mit der Stylesheet-Sprache „CSS“ realisiert, um Gestaltung und Inhalt voneinander zu trennen. Der Aufbau der Seite lässt sich in verschiedene Bereiche unterteilen. Sie besteht aus

einem Kopf, mit Banner bzw. Seitenüberschrift und einer Navigationsleiste, einem Rumpf und einem Fußzeilenmenü. Um die Seite optisch möglichst schlicht und elegant zu halten, sind nur zwei unterschiedliche Graustufenfarbtöne zum Einsatz gekommen.

Bild 4-2 zeigt die Hauptseite.



Bild 4-2: Datenbankanwendung Hauptseite

Figure 4-2: Database application Home

Der Kopf der Seite enthält die Navigationsleiste der vier Hauptseiten, die auch im Rumpf zu erkennen sind. Im Folgenden werden die Funktionen der vier Seiten kurz vorgestellt:

- Test data: Diese Seite dient der Anzeige von Daten einer Versuchsserie.

- Search for fatigue data: Auf dieser Seite kann gezielt nach Versuchsserien mit bestimmten Eigenschaften gesucht werden.
- Evaluation fatigue data: Diese Seite ermöglicht die Auswertung einer vorher ausgewählten oder gesuchten Versuchsserie gemäß der statischen Methode, siehe Abschnitt 3.
- Insert fatigue data: Auf dieser Seite können neue Quellen und Versuchsserien in die Datenbank eingetragen werden.

Die Fußzeile enthält Links zu den Seiten „Contact“, „Impressum“ und „Background“, wo Kontaktinformationen zu den Forschungsstellen zu finden sind und der Hintergrund der Website erklärt ist. Auf allen Hauptseiten, außer der Hauptseite selbst, gibt es die Funktionen „Home“ und „Back“ um dem Nutzer eine interaktive Nutzung der Website zu ermöglichen.

In den folgenden Abschnitten wird der Aufbau der Website erläutert, indem die Funktionen der einzelnen Unterseiten beschrieben werden. Auf allen Unterseiten wird das gleiche Design wie auf der Hauptseite verwendet. Abbildungen der Unterseiten befinden sich im Anhang C – Datenbankanwendung.

4.3.2 Darstellung der Daten

Presentation of data

Über die erste Hauptseite „Test data“ gelangt man auf eine Übersichtseite, die alle gesammelten Informationen einer Serie der Datenbank angibt. Bild 24-1 und Bild 24-2 zeigen zu welchen Kategorien Unterseiten existieren. Durch Klicken auf die Überschrift oder das Symbol gelangt man auf die jeweilige Seite, wo die zugehörigen Informationen aller Serien abgerufen werden können. In Bild 24-3 und Bild 24-4 sind beispielhaft die beiden Unterseiten „Overview“ und „List of sources“ abgebildet. Beide Unterseiten werden in Form einer Tabelle dargestellt. Die erste Zeile enthält jeweils die Spaltenüberschrift. Durch Klicken auf diese Überschrift gelangt man zu einer Unterseite „Information“, siehe Bild 24-5, welche die genaue Bedeutung der jeweiligen Spalte erläutert.

In der Tabelle „Overview“ sind alle bisher eingetragenen Serien mit zunächst nur den relevantesten Informationen aufgelistet (ID, Beschreibung, Detail, Anzahl Versuchsergebnisse, Bild). In der letzten Spalte „More information“ befinden sich Verlinkungen zu allen weiteren Angaben (Allgemein, Belastung, Material, Schweißnähte, etc.). Die Tabelle „List of sources“ enthält, analog zum Aufbau der Tabelle „Overview“, alle eingearbeiteten Quellen. Außerdem befindet sich am oberen, rechten Rand eine Suchfunktion. In diesem Feld können ein oder auch mehrere beliebige Suchbegriffe eingegeben werden, um eine bestimmte Quelle zu finden.

4.3.3 Suche nach Daten

Search for data

Die zweite Hauptseite „Search for Series“, siehe Bild 24-6, ermöglicht eine Suche nach eingetragenen Versuchsserien und den zugehörigen Versuchsergebnissen, basierend auf vom Nutzer angegebenen Suchkriterien. Auf der ersten Seite wird per Dropdown Menü zunächst die gewünschte Tabelle des Kerbfallkataloges ausgewählt. Daraufhin können mittels Multiple-Choice-Funktion beliebig viele, für die Suche relevante, Ermüdungsdetails der ausgewählten Tabelle angeklickt werden. Anschließend besteht die

Möglichkeit, weitere Suchkriterien zu allgemeinen Daten, Belastung, Material, Schweißnaht und Versuchsergebnissen einzugeben. Am unteren rechten Rand der Suche befindet sich der Button „Send request“, wodurch die Suche abgeschickt wird. Bild 24-7 zeigt ein Suchergebnis, welches in Tabellenform angezeigt wird. Die Tabelle besitzt den gleichen Aufbau wie die Unterseite „Overview“, welche alle bisher eingetragenen Serien beinhaltet (siehe Bild 24-3).

4.3.4 Auswertung von Daten

Evaluation of data

Die dritte Hauptseite „Evaluation fatigue data“ ermöglicht eine Auswertung von Versuchsserien. Hierzu muss die ID einer Versuchsserie per Dropdown Menü ausgewählt werden. Zweckmäßiger kann die Seite genutzt werden, wenn vorher nach einer Serie mit bestimmten Eigenschaften gesucht worden ist, die nachfolgend ausgewertet werden soll. Folglich kommt man auch über die „Search for series“ Seite nach Auswahl einer Serie zur Auswertungsseite. Diese enthält auf der ersten Seite eine Anzeige der auszuwertenden Versuchsdaten einer Serie, siehe Bild 24-8. Zunächst muss hier über ein Dropdown Menü das Versagenskriterium ausgewählt werden, denn dafür stehen ggf. Mehrere zur Verfügung. Zudem muss angegeben werden, ab welcher Zyklenzahl bei der Auswertung ein Durchläufer definiert sein soll. Gemäß Abschnitt 3 ist hier die Zahl $5 \cdot 10^6$ voreingestellt. Durch Absenden der Daten über den „send“ Button gelangt man auf die zweite Seite, wo die statistische Auswertung dokumentiert ist, siehe Bild 24-9. Kleinschrittig werden hier auf Basis der Spannungsschwingbreite S und der Zyklenzahl N aus der Datenbank die Werte $\log S$, $\log N$, $\log a$, $(\log \bar{a} - \log a)^2$ tabelliert. Zudem ist die Stichprobenanzahl n , die Standardabweichung s sowie das Endergebnis der Auswertung, der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit der Serie $\Delta\sigma_c$ angegeben.

4.3.5 Eintragung von Daten

Import of data

Mit der vierten und letzten Hauptseite „Insert Fatigue Data“ ermöglicht die Website dem Nutzer, neue Datensätze (Quellen, Serien und zugehörige Testergebnisse) in die Datenbank einzupflegen. Die Eintragung von Daten gliedert sich in drei Schritte. Als erstes wird die Quelle angelegt, in der die Serie dokumentiert ist. Im zweiten Schritt werden alle vorliegenden Informationen zur gefundenen Serie eingearbeitet und im letzten Schritt werden schließlich die zugehörigen Versuchsergebnisse eingetragen.

Durch Klicken auf die Hauptseite „Insert fatigue data“ in der Navigationsleiste gelangt man zunächst zur Unterseite „Insert new source“. Hier werden zunächst alle wichtigen Informationen zur Quelle eingetragen, siehe Bild 24-10. Durch ein anschließendes Klicken auf „save“ wird die Seite neugeladen und am oberen Rand erscheint die Bestätigung „New Source has been saved with a corresponding Source ID: 000“. Um zur nächsten Seite zu gelangen, befindet sich am unteren rechten Rand der Button „Insert general data“.

Im zweiten Schritt werden allgemeine Information zu der Serie eingetragen. Zuerst wird per Dropdown Menü die Tabelle des Kerbfallkataloges und das jeweilige Detail ausgewählt. Daraufhin können weitere Angaben zu allgemeinen Informationen, der Belastung, dem Material, der Schweißnaht, den Umgebungsbedingungen und spezifischen Detaileigenschaften gemacht werden. Auch hier besteht die Möglichkeit durch Klicken auf die Überschrift genauere Information zu dem jeweiligen auszufüllenden Feld zu erhalten,

siehe Bild 24-5. Im Bereich „General“ wird nach der Quellen ID gefragt. Damit der Nutzer die Möglichkeit hat, diese einfach herauszufinden, wird die Quellen ID, der zuletzt eingetragenen Quelle auf dieser Seite angezeigt. Soll eine andere Quellen ID als die der zuvor Gespeicherten eingetragen werden, kann über den Button „Search for Source ID“ die Übersichtsseite aller eingetragener Quellen erreicht und dort nach der entsprechenden Quelle gesucht werden.

Durch ein anschließendes Klicken auf „save“ wird auch diese Seite neugeladen und am oberen Rand erscheint die Bestätigung, dass die angegebenen Informationen erfolgreich gespeichert wurden. Um zur nächsten Seite zu gelangen, befindet sich am unteren rechten Rand der Button „Insert test data“, siehe Bild 24-11.

Im letzten Schritt werden schließlich die zur Serie gehörenden Versuchsdaten eingetragen. Als erstes wird nach der Serien ID gefragt. Damit der Nutzer die Möglichkeit hat, diese einfach herauszufinden, wird die ID der zuletzt eingetragenen Serie oberhalb der Tabelle angezeigt. Auch auf dieser Seite besteht die Möglichkeit durch Klicken auf die Überschrift genauere Information zu der jeweiligen zu füllenden Spalte zu erhalten, siehe Bild 24-5. Durch ein abschließendes Klicken auf „save“ wird auch diese Seite neugeladen und am oberen Rand erscheint die Bestätigung, dass die angegebenen Informationen erfolgreich gespeichert wurden. Hiermit ist der Prozess der Dateneinpflegung beendet.

5 Analyse der Versuchsdatensammlung

Analysis of test data collection

Kurzfassung

In diesem Abschnitt wird die im Rahmen dieser Forschungstätigkeit angewendete Vorgehensweise beim Aufbau der Datensammlung, also Literaturrecherche, Aufarbeitung und Füllen der Datenbank mit Versuchsdaten, beschrieben. Weiter wird die generelle Vorgehensweise der daran angegliederten Datenselektion, also die Auswahl der Ermüdungsversuchsergebnisse, die zur Auswertung und Kerbfallableitung herangezogen werden, dargelegt.

Abstract

This chapter describes the methods and procedures, i.e. literature research, processing and filling of the database with test results, taken in this research work to build up the data collection. Furthermore, the general techniques of data selection, i.e. the selection of the fatigue test results which are used for the evaluation and fatigue classification, are explained.

5.1 Literaturrecherche und Quellenqualität

Literature research and source quality

Als Ausgangsbasis der Literaturrecherche dieser Forschungstätigkeit dient das Hintergrunddokument zu DIN EN 1993-1-9 [4]. In [4] sind zu einer Vielzahl der Kerbdetails nach DIN EN 1993-1-9 [1] unterschiedlichster Versuchsserien und deren Literaturverweise zusammengetragen. Im Rahmen dieser Forschungstätigkeit wurde versucht, alle zu diesen Versuchsdaten gehörenden Primärquellen, also Veröffentlichungen bzw. Originaldokumente aus erster Hand der durchgeführten Ermüdungsversuche, zu beschaffen und zumindest die wesentlichen Kapitel zu digitalisieren. Da die Entstehungszeit der im Hintergrunddokument [4] zusammengetragener Ermüdungsversuche jedoch zwischen 1950 und 1990 liegt, ist die Verfügbarkeit der Originaldokumente mittlerweile unzureichend und der Dokumentationsumfang weist erhebliche Informationslücken auf. Einige wenige Originaldokumente konnten auch nach mehrmaliger umfangreicher Recherche nicht mehr auffindig gemacht werden. Alle vorhandenen Dokumente wurden aufgearbeitet und sofern als Primärquelle deklariert entsprechend der entwickelten Datenbankstruktur in die Datensammlung aufgenommen. Als zweite Quelle dienten eigene Ermüdungsversuchsergebnisse der drei Forschungsstellen aus den letzten Jahrzehnten, sofern die Daten nicht ohnehin bereits im Hintergrunddokument zu DIN EN 1993-1-9 [4] erfasst sind. Durch eine anschließende, ergänzende Literaturrecherche wurde in einem weiteren Schritt versucht, für diejenigen Kerbdetails, für die keine bzw. nur wenige Versuchsdaten vorlagen durch weitere Versuchsdaten aus Primärquellen diese Lücken in der Datensammlung sukzessive zu schließen. Dadurch kann auch auf zahlreiche Versuchsergebnisse aus jüngerer Vergangenheit zurückgegriffen werden. Eine qualitative Verteilung des Entstehungszeitraums der gegenwärtig in der Datensammlung beinhalteten Versuchsdaten ist in Bild 2-12 dargestellt. Auf Grundlage des aktuellen Datenbestands, kann bestätigt werden, dass bereits in den 1960er und 1970er Jahren eine umfangreiche Grundlagenforschung an den Standardkerbdetails durchgeführt wurde. Bei vielen Kerbdetails spiegeln

sich die Fertigungsmethoden und -standards aus dieser Zeit in den für die statistische Auswertung herangezogenen Ermüdungsversuchen wider.

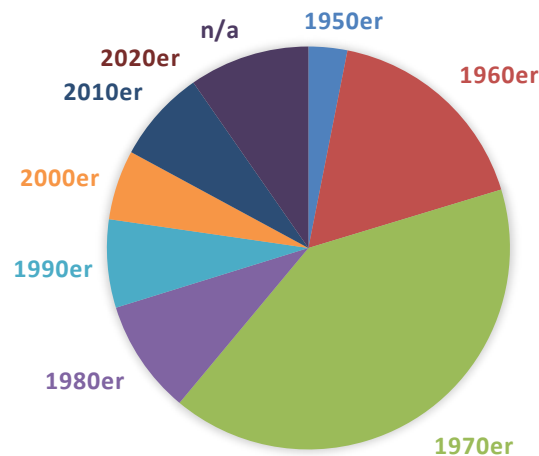


Bild 5-1: Entstehungszeit der Datensammlung – qualitative Verteilung

Figure 5-1: Data collection's period of origin – qualitative distribution

Beim Aufarbeiten der Primärquellen fällt auf, dass zwischen den unterschiedlichen Veröffentlichungen hinsichtlich Quellenqualität, also Art und Umfang der Ermüdungsversuchsdokumentation gravierende Unterschiede bestehen. Generell kann die Verfügbarkeit von Informationen in meistens, teilweise und sehr selten dokumentierte Informationen kategorisiert werden. So sind grundsätzlich die Spannungsschwingbreiten, Schwingspielzahlen und Spannungsverhältnisse in fast allen Quellen angegeben. Bei der Darstellung von Spannungsschwingbreite und Schwingspielzahl unterscheiden sich die einzelnen Quellen in tabellarische und grafische Darstellung im Wöhlerdiagramm, wobei die grafische Darstellung bei der Überführung in die Datenbank stets mit einer gewissen Unschärfe behaftet ist. Zu den teilweise dokumentierten Informationen zählen u. a. Angaben bezüglich eines definierten Abbruchkriteriums der Ermüdungsversuche, geometrische Angaben zu den Probekörpern, Informationen zur Schweißnahtnachbehandlung, Ort der Nennspannungsermittlung und Beschreibung der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Korrosivität). Nur sehr selten können den Quellen Angaben zu Imperfektionen der Probekörper oder zu den Schweißparametern entnommen werden.

5.2 Selektion der Versuchsserien

Selection of test series

Generell werden die verschiedenen Kerbdetails eindeutig über deren Bauteilgeometrie bzw. Ausführungsvariante, deren Beanspruchungsart und deren Versagensform definiert. Bei einigen Probekörpertypen lässt sich das Kerbdetail nicht alleine durch die Bauteilform ableiten, weil bspw. die Versagensform aufgrund mehrerer potentieller Rissausgangsorte variieren kann. Bei der Bemessung wird häufig der pragmatische Ansatz gewählt, dass in diesem Fall für die gleiche Bauteilgeometrie mehrere Kerbdetails nachgewiesen werden müssen. Für die statistische Auswertung und Kerbfallableitung des jeweiligen Kerbdetails können aber nur diejenigen Versuchsdaten herangezogen werden, die das entsprechende Kerbdetail eindeutig repräsentieren. Daher ist es notwendig aus der Vielzahl an unterschiedlichen, in der Datenbank erfassten Versuchsergebnisse, nur diejenigen Daten

zu selektieren, die eindeutig dem jeweiligen Kerbdetail zugeordnet werden können. Hierfür muss in Abhängigkeit vom Konstruktionsdetail ein Mindestmaß an Informationen für den Datensatz in der Datenbank hinterlegt sein. Generell zählen hierzu Angaben zur Bauteilgeometrie, zum Versagensort, zur Beanspruchungsart und zum Ort der Spannungsermittlung. In Abhängigkeit vom jeweiligen Kerbdetail müssen bei der Datenselektion weitere Informationen vorhanden sein.

Oftmals fiel bei der Aufarbeitung der Quellen oder erst bei der statistischen Auswertung auf, dass einzelne Versuchsserien Dopplungen enthalten oder keine eigenen Versuchsdaten enthalten, sondern nur frühere Versuche zusammenfassen und bspw. neu auswerten. Dopplungen und Daten aus Sekundärliteratur wurden bei der Datenselektion nicht berücksichtigt.

Ausgehend vom Datenumfang des jeweiligen Kerbdetails kann die Datenqualität durch weitere optionale Filterkriterien gesteigert werden. Hierzu zählt bspw. eine Begrenzung der Datenherkunft auf Primärquellen, der Datenverfügbarkeit auf die tabellarische Form, der Mindestversuchsanzahl je Versuchsserie usw. Die konkret für statistischen Auswertung und Kerbfallableitung gewählten Filterkriterien des jeweiligen Kerbdetails sind in Kapitel 6 angegeben.

6 Auswertung der gesammelten experimentellen Daten

Evaluation of the collected experimental data

In diesem Abschnitt werden die Neuauswertungen aller Details thematisiert, von denen Versuchsergebnisse vorliegen. Dabei wird je Tabelle des aktuellen Kerbfallkatalogs [1] auf jedes Detail einzeln eingegangen. Zunächst wird eine Übersicht über das Detail gegeben. Nachfolgend werden alle verfügbaren experimentellen Versuchsergebnisse präsentiert. Ferner werden Versagensmerkmale und signifikante Einflussparameter auf die Ermüdungsfestigkeit herausgearbeitet. Schließlich wird eine neue Kerbfallableitung mit dem in Abschnitt 3 vorgestelltem statistischem Verfahren durchgeführt und präsentiert.

This section deals with the re-evaluation of all details for which test results are available. Each detail of each table is individually dealt with for the current detail catalogue [1]. First, an overview of the detail is given. In the following, all available experimental test results are presented. Furthermore, failure characteristics and significant influencing parameters on fatigue strength are worked out. Finally, a new fatigue class derivation is performed and presented using the statistical method presented in Section 3.

6.1 Ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln – Tabelle 8.1

Plain members and mechanically fastened joints – Table 8.1

6.1.1 Übersicht

Overview

Tabelle 8.1 der DIN EN 1993-1-9 [1] regelt die Ermüdungsfestigkeit von ungeschweißten Bauteilen und Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln. Dies umfasst zunächst gewalzte oder (strang-)gepresste Erzeugnisse, die dem höchstmöglichen Kerbfall 160 angehören. Zudem sind in dieser Tabelle gescherte oder brenngeschnittene Bleche geregelt. Außerdem gehören der Tabelle 8.1 geschraubte Bleche verschiedener Konstellationen, wie einschnittige oder zweischchnittige Verbindungen mit vorgespannten oder Passschrauben, sowie Schrauben und Gewindestangen an.

6.1.2 Gewalzte Erzeugnisse in Form von Walzprofilen – Detail 2

Rolled sections – Detail 2

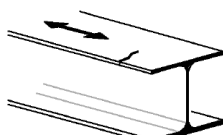
6.1.2.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der gewalzten und gepressten Erzeugnisse nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-1: Rolled sections according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160		Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse: Walzprofile mit gewalzten Kanten	Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.

6.1.2.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Walzprofil“ ist nur eine begrenzte Anzahl an Daten bekannt, wie Tabelle 6-2 zeigt.

Tabelle 6-2: Übersicht Datengrundlage: „Walzprofil“

Table 6-2: Overview database: “Rolled section”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	80
Anzahl Quellen	3
Anzahl Serien	5

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Walzprofil“ ist in Bild 6-1 zu erkennen. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

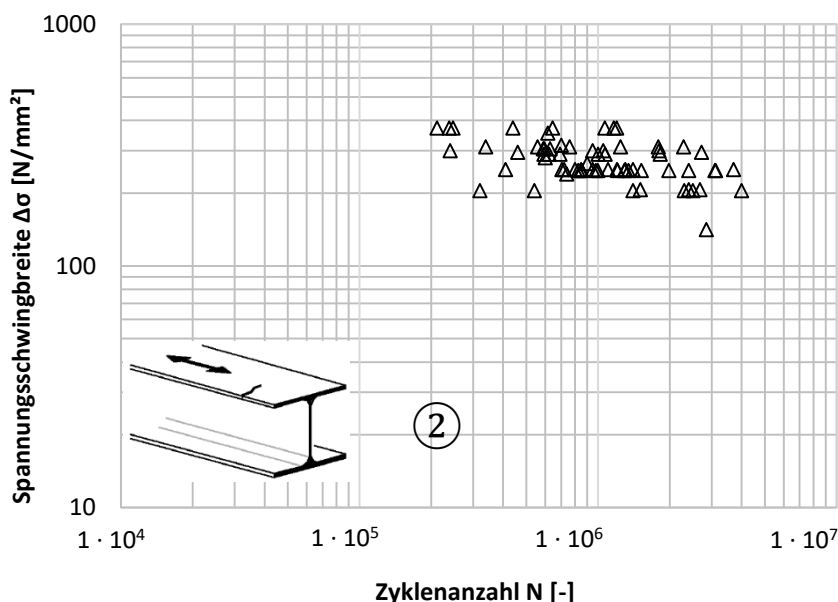


Bild 6-1: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Walzprofil“ #012 #028 #029

Figure 6-1: Illustration of experimental fatigue data for detail “Rolled section”

6.1.2.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Das Versagen der auf Ermüdung getesteten Walzprofile ging typischer Weise entweder vom Ausradiusradius des Profils oder vom Flanschende aus, wie Bild 6-2 zeigt.

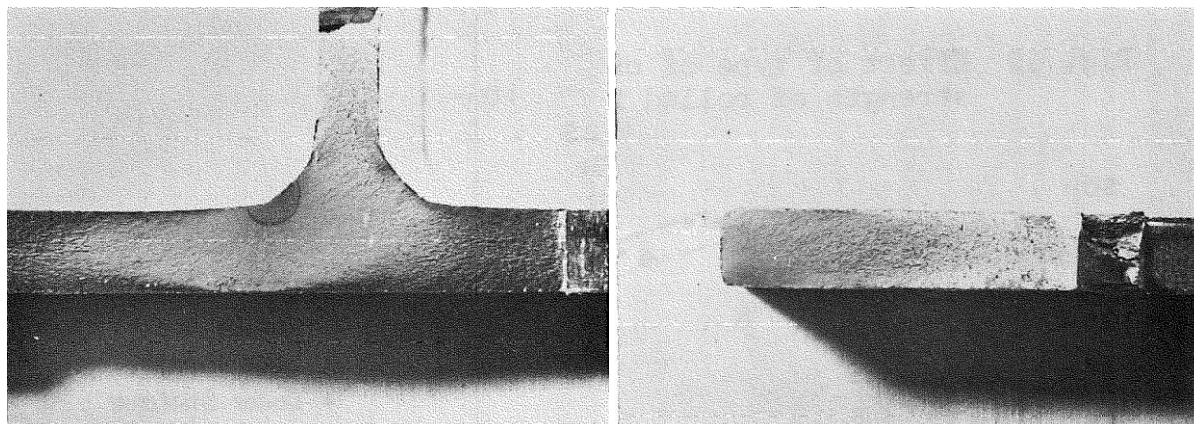


Bild 6-2: Probekörper mit Ermüdungsriß am Ausradiusradius und am Flanschende (v.l.n.r.) #028

Figure 6-2: Specimens with fatigue crack on fillet and flange tip (f.l.t.r) #028

6.1.2.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

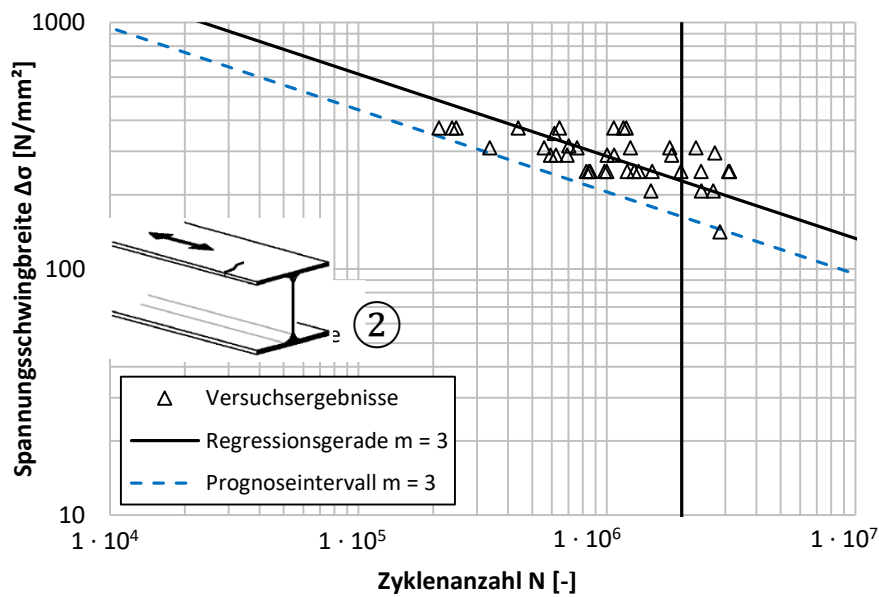
Die Ermüdungsfestigkeit von Walzprofilen ist stark vom Ausgangszustand der Oberfläche und dem Vorhandensein von Fehlstellen abhängig. In #028 und #029 wird festgestellt, dass die Spannungsschwingbreite außerdem die dominante Einflussgröße ist und es anhand der vorliegenden Daten keinen signifikanten Einfluss der Streckgrenze auf die Ermüdungsfestigkeit gibt.

6.1.2.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Aufgrund der relativ geringen Datenbasis war eine gezielte Filterung der Daten nicht möglich. Zur Auswertung wurden dennoch nur die aussagekräftigen Primärquellen #028 und #029 herangezogen, während #012 kaum Informationen zu den Versuchsserien liefert.

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 163 und liegt damit über der derzeit gültigen Kerbfallklasse in DIN EN 1993-1-9 [1] und bestätigt somit Kerbfall 160, siehe Bild 6-3.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 163 [N/mm²]

Bild 6-3: Kerbfalleinleitung „Walzprofil“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #028 #029)

Figure 6-3: Fatigue classification of „Rolled section“ based on selected test results

6.1.3 Maschinell gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung – Detail 4

Machine gas cut or sheared material with subsequent dressing – Detail 4

6.1.3.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der maschinell gescherten oder brenngeschnittenen Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: Maschinell gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-3: Machine gas cut or sheared material with subsequent dressing according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
140		<u>Gescherte oder brenngeschnittene Bleche:</u> Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung	Alle sichtbaren Randkerben sind zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen. Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z. B. Schleifen) müssen parallel zu den Spannungen verlaufen. Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq \frac{1}{4}$) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen. Keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut.

6.1.3.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „maschinell brenngeschnittene Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung“ sind einige Serien bekannt, die jedoch jeweils relativ wenige Einzelversuche enthalten, wie Tabelle 6-4 zeigt.

Tabelle 6-4: Übersicht Datengrundlage: „Maschinell brenngeschnittene Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung“

Table 6-4: Overview database: “Machine gas cut or sheared material with subsequent dressing”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	47
Anzahl Quellen	5
Anzahl Serien	14

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „brenngeschnittene Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung“ ist in Bild 6-4 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt. Aufgrund der geringen Kerbschärfe des Details durch die mechanische Nachbehandlung ist anhand der ungefilterten Datenbasis bereits ersichtlich, dass eine Regressionsgerade bzw. Wöhlerlinie sehr flach verläuft.

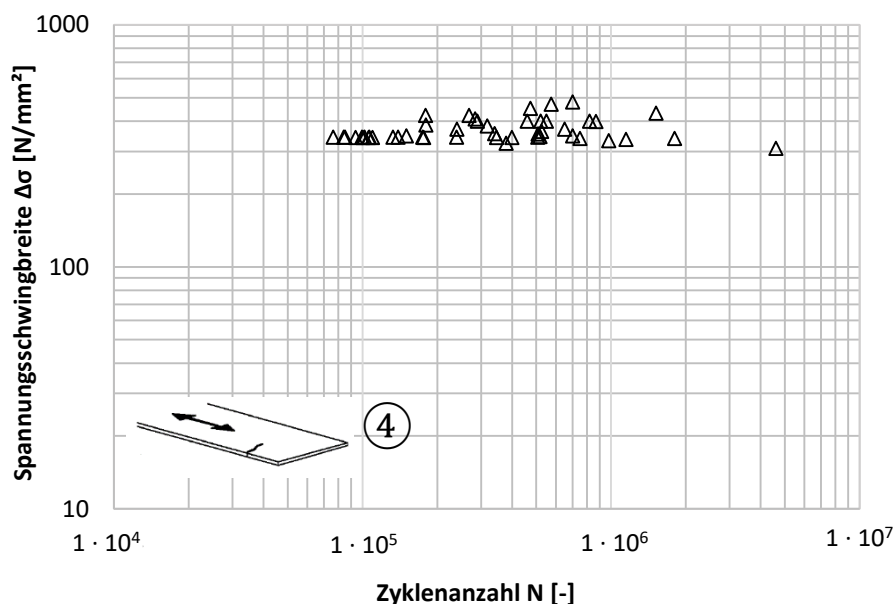


Bild 6-4: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Maschinell brenngeschnittene Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung“ #001 #005 #250 #251 #252

Figure 6-4: Illustration of experimental fatigue data for detail “Machine gas cut or sheared material with subsequent dressing”

6.1.3.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Das Versagen der auf Ermüdung getesteten brenngeschnittenen Bleche, die nachträglich mechanisch bearbeitet wurden ging typischer Weise von der Seitenfläche mit Walzhaut aus, wie Bild 6-5 zeigt #250.

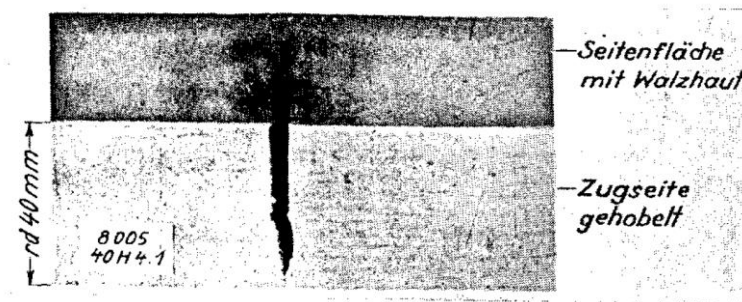


Bild 6-5: Probekörper mit Ermüdungsriss an der Seitenfläche mit Walzhaut #250

Figure 6-5: Specimens with fatigue crack on rolled surface #250

6.1.3.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

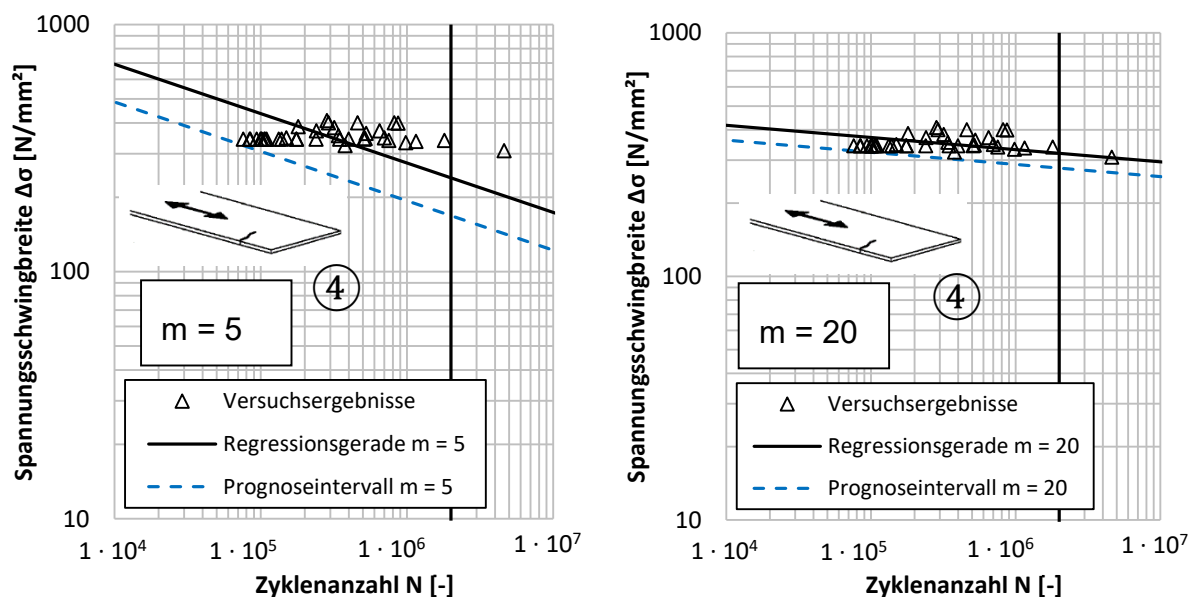
Die Ermüdungsfestigkeit von brenngeschnittenen Kanten mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung hängt weniger von der Qualität des Brennschnitts ab, denn die Kanten sind bearbeitet, sondern von der negativen Wirkung der Wärmeeinflusszone, wie in #252 beschrieben wird. Die verschiedenen mechanischen Nachbehandlungsmethoden zeigen unterschiedliche Ergebnisse in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit #252.

6.1.3.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Einige Serien der vorhandenen Quellen wurden nicht in die Auswertung einbezogen, da sie nur Einzelversuche an einem oder zwei Probekörpern mit bestimmten Nachbehandlungsmethoden enthielten. Wie auch schon in Bild 6-4 zu erkennen ist, verläuft die Regressionsgerade der Versuchsergebnisse mit einer sehr flachen inversen Steigung, die bei einigen Einzelerien über 100 beträgt. Aus diesem Grund wird die Kerbfallableitung für das Detail „Maschinell brenngeschnittene Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung“ nicht mit der gängigen inversen Steigung $m = 3$ für geschweißte Bauteile, sondern mit der flacheren, jedoch üblichen inversen Steigung $m = 5$ durchgeführt.

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse mit der Steigung $m = 5$ liefert Kerbfall 168 und liegt damit sogar über dem maximal anwendbaren Kerbfall 160 der DIN EN 1993-1-9 [1]. Wie in Bild 6-6 zu erkennen ist, würde eine Wöhlerlinie mit einer noch flacheren inversen Steigung die Versuchsergebnisse noch besser widerspiegeln. Jedoch wird der Wert der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ immer größer, je größer die inverse Steigung m wird. Da im Dauerfestigkeitsbereich nicht viele Versuchswerte vorliegen, sollte mit der Erhöhung der Dauerfestigkeit überlegt umgegangen werden. Durch die mechanische Nachbehandlung der Kanten wird ein sehr kerbweiches Detail erzeugt, sodass eine Hochstufung auf Kerbfall 160, genau wie für gewalzte Erzeugnisse, empfohlen werden kann. Dafür spricht auch, dass das Versagen bei mechanisch nachbehandelten Kanten von der gewalzten Fläche ausgeht und somit die Versagensart von gewalzten Erzeugnissen widerspiegelt, vergleiche Bild 6-5.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 168 [N/mm²]

Bild 6-6: Kerbfalleitung „maschinell brenngeschnittener Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #001 #005 #250 #251 #252)

Figure 6-6: Fatigue classification of “machine gas cut or sheared material with subsequent dressing” based on selected test results

6.1.4 Gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnittene und mechanisch bearbeitete Bleche – Detail 5

Material with machine gas cut edges having shallow and regular drag lines or manual gas cut material, subsequently dressed – Detail 5

6.1.4.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der gescherten oder brenngeschnittenen Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnittenen und nachträglich mechanisch bearbeiteten Bleche nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-5 dargestellt.

Tabelle 6-5: Gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnitten und nachträglich bearbeitet nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-5: Material with machine gas cut edges having shallow and regular drag lines or manual gas cut material, subsequently dressed according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
125		<u>Gescherte oder brenngeschnittene Bleche</u> : Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennriefen oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung. Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.	Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq \frac{1}{4}$) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen. Keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut.

6.1.4.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnittene und nachträglich mechanisch bearbeitete Bleche“ sind viele Versuchsserien bekannt, wie Tabelle 6-6 zeigt.

Tabelle 6-6: Übersicht Datengrundlage: „Brenngeschnittene Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnitten und nachträglich bearbeitet“

Table 6-6: Overview database: “Material with machine gas cut edges having shallow and regular drag lines or manual gas cut material, subsequently dressed”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	203
Anzahl Quellen	10
Anzahl Serien	40

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Brenngeschnittene Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnitten und nachträglich bearbeitet“ ist in Bild 6-7 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

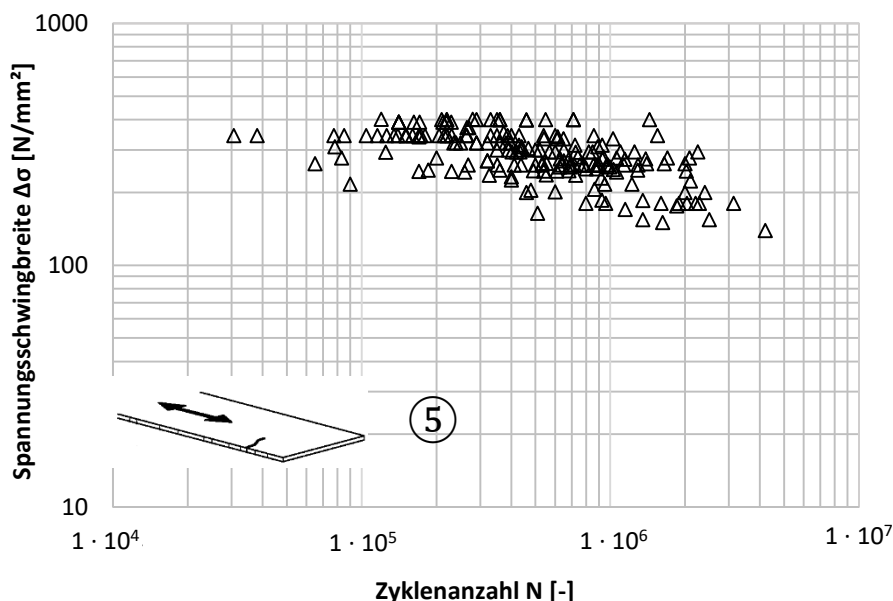


Bild 6-7: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Brenngeschnittene Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnitten und nachträglich bearbeitet“ #001 #002 #003 #004 #005 #006 #250 #251 #252 #253

Figure 6-7: Illustration of experimental fatigue data for detail “Material with machine gas cut edges having shallow and regular drag lines or manual gas cut material, subsequently dressed”

6.1.4.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Das Versagen der auf Ermüdung getesteten brenngeschnittenen Bleche begann typischer Weise an der brenngeschnittenen Fläche, wie Bild 6-8 zeigt.

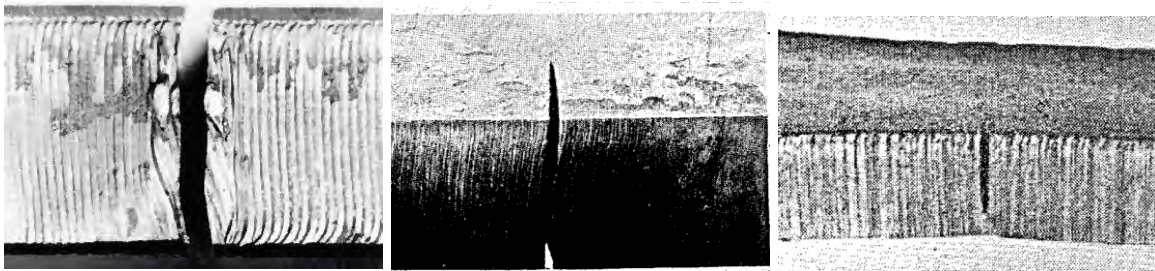


Bild 6-8: Probekörper mit Ermüdungsriß an der brenngeschnittenen Kante #3, #250, #251 (v.l.n.r)

Figure 6-8: Specimens with fatigue crack on gas cut edge #3, #250, #251 (f.l.t.r)

6.1.4.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

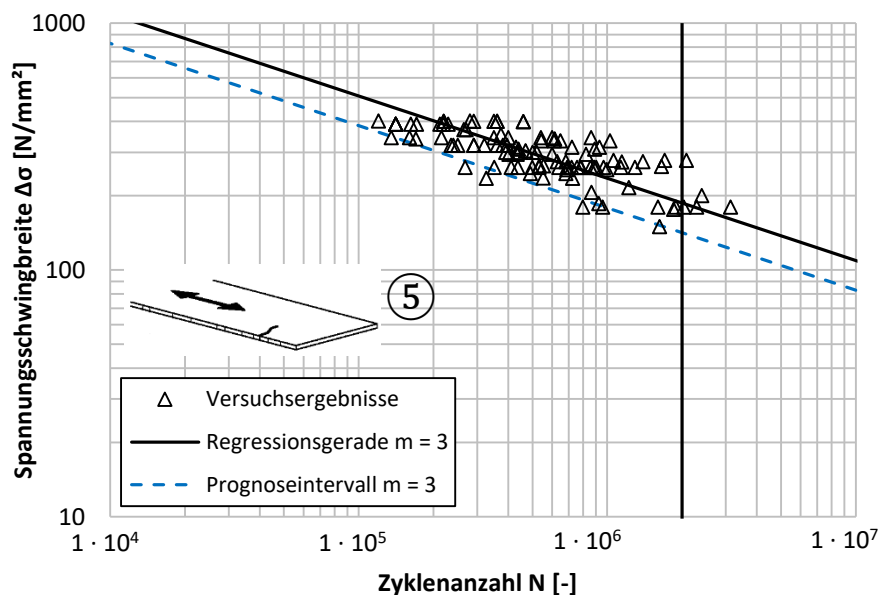
Significant influence parameters on the resistance side

Bei Blechen mit brenngeschnittenen Kanten hat die Qualität des Brennschnitts einen entscheidenden Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Die Rauigkeit der Oberfläche spielt dabei eine große Rolle #003. Des Weiteren sollen Eigenspannungen einen Einfluss haben, dessen Größe durch die Schnittgeschwindigkeit, Flammengröße und Art der Düse beeinflusst wird #004.

6.1.4.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Viele der Quellen stammen aus den 50er und 60er Jahren und weisen daher einen anderen Dokumentationsstandard als heutige Veröffentlichungen auf.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 142 [N/mm²]

Bild 6-9: Kerbfallableitung „Brenngeschnittener Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnitten und nachträglich bearbeitet“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #001 #003 #004 #006 #250 #251 #253)

Figure 6-9: Fatigue classification of “Material with machine gas cut edges having shallow and regular drag lines or manual gas cut material, subsequently dressed” based on selected test results

Einige Serien der vorhandenen Quellen konnten daher aus verschiedenen Gründen nicht mit in die Auswertung einbezogen werden. Bei einigen Serien wurden „absichtlich schlechte“ Brennschnitte produziert, die in der Praxis derart nicht hergestellt werden, um

den Einfluss zu untersuchen. Bei anderen Serien ging aus der Dokumentation nicht hervor, ob es sich bei den genannten Spannungswerten um Spannungsamplitude oder die -schwingbreite handelt. Bei anderen Serien wurden die brenngeschnittenen Kanten durch Schweißungen ausgebessert, was laut DIN EN 1993-1-9 [1] nicht erlaubt ist (vgl. Tabelle 6-6). Außerdem wurden alle Serien aussortiert, bei denen eine Vor- oder Nachbehandlung durchgeführt wurde, die im Eurocode nicht zugelassen ist.

Die statistische Auswertung der gefilterten experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 142 und liegt damit deutlich über dem Kerbfall 125 der DIN EN 1993-1-9 [1]. Auf der präsentierten Datenbasis ist eine Hochstufung des Kerbfalls auf Kerbfallklasse 140 möglich. Es sollte jedoch beachtet werden, dass die Wöhlerlinie des Details 5 aufgrund der schlechteren Ausführungsqualität immer konservativer liegen sollte, als die des Details 4.

6.1.5 Symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben – Detail 8

Double covered symmetrical joint with preloaded bolts – Detail 8

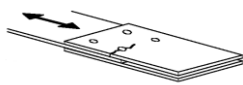
6.1.5.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der symmetrischen zweischnittigen Verbindung mit vorgespannten Schrauben nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-7 dargestellt.

Tabelle 6-7: Symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-7: Double covered symmetrical joint with preloaded bolts according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
112		Symmetrische zweischnittige Verbindung vorgespannten Schrauben (HV- oder Injektionsschrauben)	$\Delta\sigma$ ist am Bruttoquerschnitt zu ermitteln. Einhaltung bestimmter Lochabstände

6.1.5.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben“ sind wenige Quellen bekannt, die jedoch eine Vielzahl an Wöhlerversuchen enthalten, wie Tabelle 6-8 zeigt.

Tabelle 6-8: Übersicht Datengrundlage: „Symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben“

Table 6-8: Overview database: “Double covered symmetrical joint with preloaded bolts”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	241
Anzahl Quellen	3
Anzahl Serien	22

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben“ ist in Bild 6-10 dargestellt.

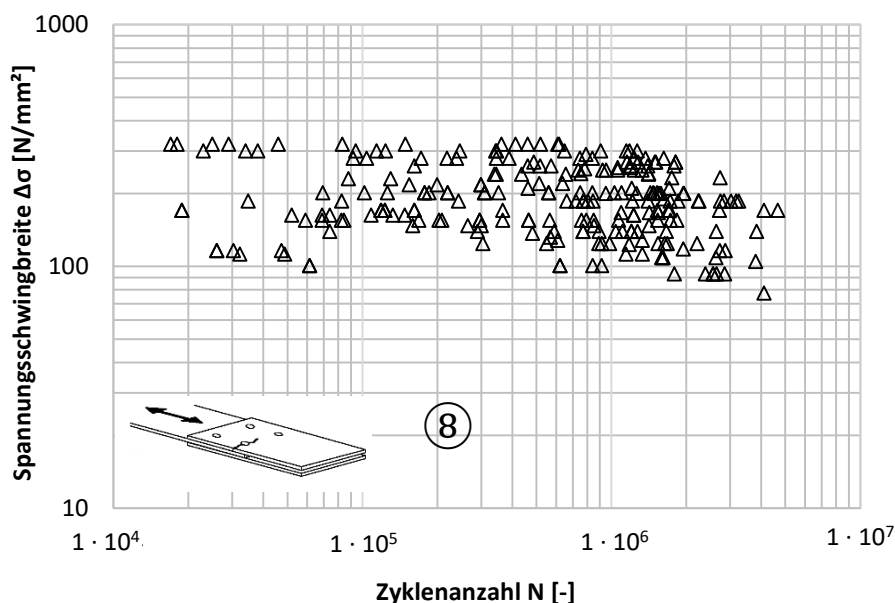


Bild 6-10: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben“ #280 #008 #009 #1006

Figure 6-10: Illustration of experimental fatigue data for detail “Double covered symmetrical joint with pre-loaded bolts”

Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt. Bei den Schrauben der Probekörper handelt es sich in allen Fällen um hochfeste Schrauben, es liegen keine Versuche zu Injektionsschrauben vor. Dabei fällt auf, dass die Versuchsdaten einer großen Streuung unterliegen. Der Großteil der Versuchsergebnisse beruht auf Quelle #280, wo eine umfangreiche experimentelle Studie zu feuerverzinkten Verbindungen verschiedener Konfigurationen gemacht wurde.

6.1.5.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Das Versagen der auf Ermüdung getesteten symmetrischen zweischnittigen Verbindung mit vorgespannten Schrauben ging typischer Weise vom Bohrloch aus los, wie Bild 6-11 zeigt.

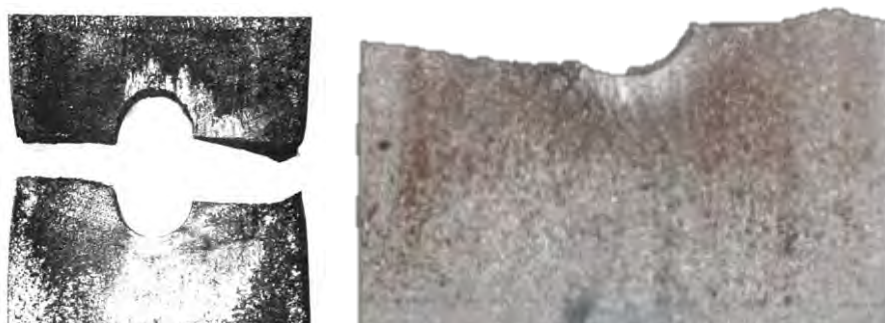


Bild 6-11: Probekörper mit Ermüdungsriss am Bohrloch #008, #1006 (v.l.n.r)

Figure 6-11: Specimens with fatigue crack at the bore hole #008, #1006 (f.l.t.r)

6.1.5.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

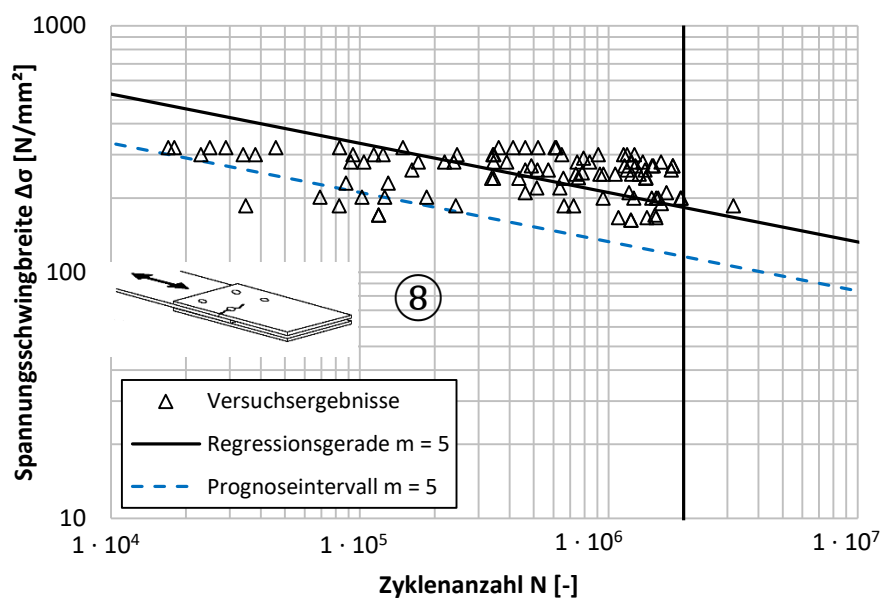
Die meisten Wöhlerversuche zur zweischnittigen vorgespannten Verbindung sind in

Quelle #280 dokumentiert, wo verschiedene Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit untersucht wurden. Dabei wurde festgestellt, dass gestanzte Löcher zu einer leicht kleineren Ermüdungsfestigkeit der Verbindung führen, als gebohrte. Zudem scheint die Feuerverzinkung keinen negativen Einfluss zu haben, da feuerverzinkte Verbindungen einen höheren Reibbeiwert besitzen und das Bauteilversagen somit bei diesem Detail später eintritt. Auch aus anderen Untersuchungen #008 geht hervor, dass eine höhere Vorspannung ebenfalls zu einer größeren Lebensdauer des Details führt #280. In #008 wurde ebenfalls festgestellt, dass eine hohe Streckgrenze des Grundmaterials sich positiv auf die Ermüdungsfestigkeit auswirkt.

6.1.5.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der durchgeführten Versuchsserien unterliegen die Ergebnisse einer großen Streuung. Für eine einheitliche Auswertung wurden zunächst Serien aussortiert, bei denen keine volle Vorspannung, sondern weniger als 100% Vorspannung gemäß EC 3-1-8 [64] aufgebracht wurde. Da das Spannungsverhältnis bei diesem Detail eine große Rolle spielt, wurden des Weiteren nur jene Serien betrachtet, bei denen $R = 0,1$ beträgt. Zuletzt wurden ebenfalls Serien an feuerverzinkten und anderweitig beschichteten Blechen herausgefiltert, da diese höhere Reibbeiwerte und Lebensdauern erzeugen als Bleche im Walzzustand.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 116 [N/mm²]

Bild 6-12: Kerbfallableitung „Symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #280, #008, #1006)

Figure 6-12: Fatigue classification of “Double covered symmetrical joint with preloaded bolts” based on selected test results

Bei der Betrachtung der verbleibenden Einzelserien fällt auf, dass deren Regressionsgerade sehr flache Steigungen, von $m^* = 6$ bis $m^* = 26$ und einem Mittelwert von $m^* = 13$, aufweisen. Um die Wöhlerlinie möglichst nah an den Versuchsergebnissen, aber auch möglichst konservativ abzuleiten, wird eine Steigung von $m = 5$ für die Auswertung herangezogen. Die statistische Auswertung der gefilterten experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 116 und liegt damit etwas über Kerbfall 112 der DIN EN 1993-

1-9 [1], vergleiche Bild 6-12. Die wenigen Versuchsergebnisse, die unterhalb der Wöhlerlinie liegen und somit nach unten streuen, stammen von Versuchen an Verbindungen mit gestanzten Löchern. Da der Kerbfallkatalog jedoch keine Anforderungen an die Bohrlochherstellung stellt, wurden diese in die Kerbfallableitung miteinbezogen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Vorspannung 100% betragen muss.

6.1.6 Zweischnittige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben – Detail 9

Double covered joint with fitted or non-preloaded injection bolts – Detail 9

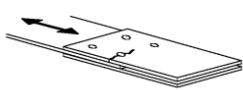
6.1.6.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der zweischnittigen Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-9 dargestellt.

Tabelle 6-9: Zweischnittige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-9: Double covered joint with fitted or non-preloaded injection bolts according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
90		Zweischnittige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben	$\Delta\sigma$ ist am Nettoquerschnitt zu ermitteln. Einhaltung bestimmter Lochabstände

6.1.6.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Zweischnittige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben“ sind wenige Quellen bekannt, wie Tabelle 6-10 zeigt.

Tabelle 6-10: Übersicht Datengrundlage: „zweischnittige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben“

Table 6-10: Overview database: “Double covered joint with fitted or non-preloaded injection bolts”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	116
Anzahl Quellen	4
Anzahl Serien	8

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „zweischnittige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben“ ist in Bild 6-13 dargestellt.

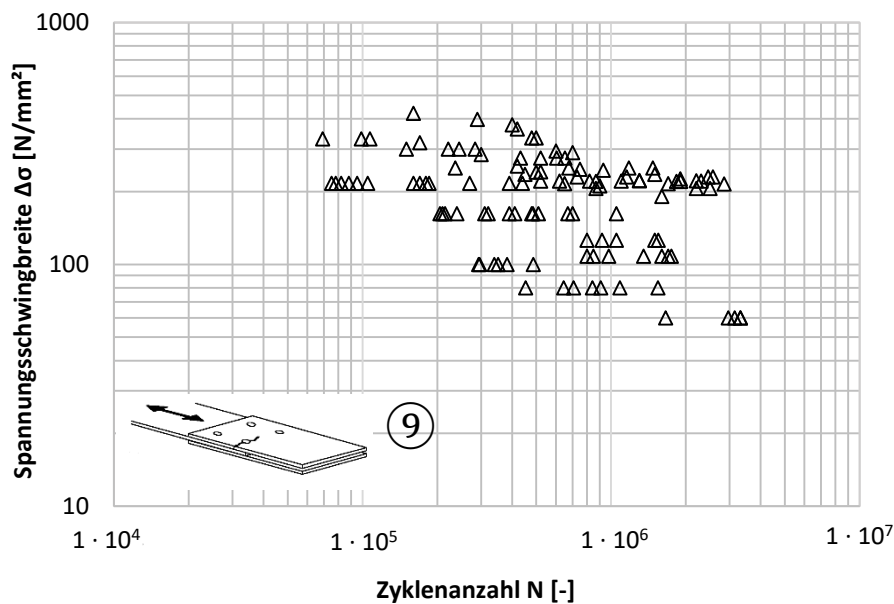


Bild 6-13: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Zweischnittige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben“ #007 #011 #013 #010

Figure 6-13: Illustration of experimental fatigue data for detail “Double covered joint with fitted or non-pre-loaded injection bolts”

Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt. Dabei fällt auf, dass die Versuchsdaten einer sehr großen Streuung unterliegen. Auch bei diesem Detail sind keine Versuche mit Injektionsschrauben bekannt.

6.1.6.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Das Versagen der auf Ermüdung getesteten zweischnittige Verbindung mit Passschrauben ging typischer Weise vom Bohrloch aus los, wie Bild 6-14 zeigt.

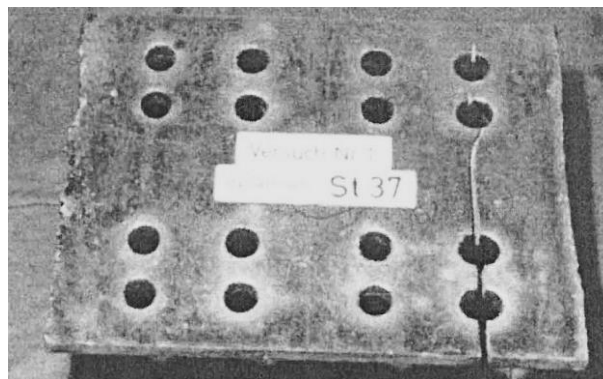


Bild 6-14: Probekörper mit Ermüdungsrisss am Bohrloch #011

Figure 6-14: Specimen with fatigue crack at the bore hole #011

6.1.6.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

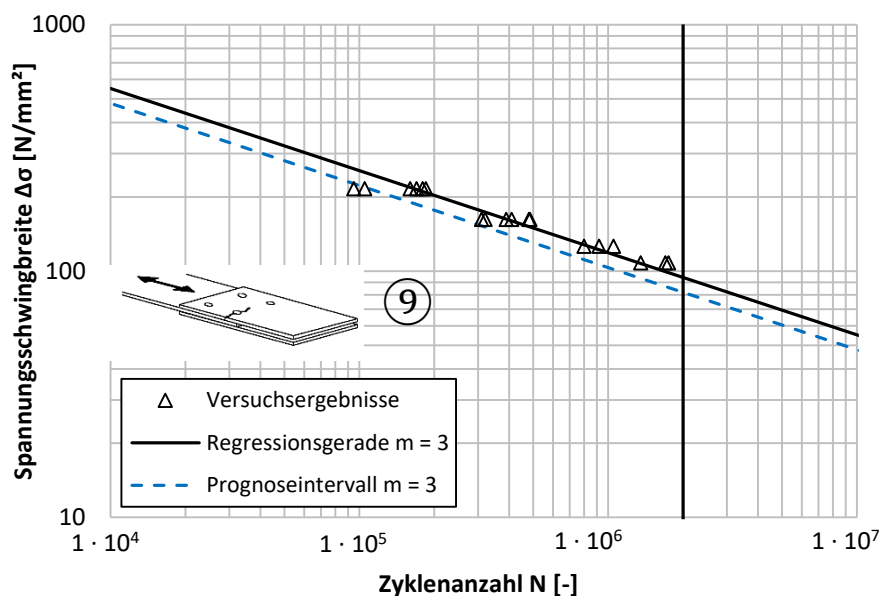
Die Fertigung, wie z.B. Brennen oder Bohren, des Bohrlochs spielt eine große Rolle für die Ermüdungsfestigkeit #011. Bei einigen Untersuchungen zeigte sich auch ein Einfluss der Streckgrenze #013.

6.1.6.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Beim Detail der zweischnittigen Verbindung mit Passschrauben musste ein Großteil der Wöhlerversuche herausgefiltert werden. Bei einigen Versuchsserien war nur der Bruttoquerschnitt bekannt, sodass die Spannungsschwingbreite nicht mit ausreichender Gewissheit auf den Nettoquerschnitt umgerechnet werden konnte. Außerdem war in einer Quelle keine Dokumentation zur Spannungsermittlung oder Geometrie der Probekörper vorhanden. Des Weiteren wurden erneut feuerverzinkte Verbindungen von der Auswertung ausgeschlossen. Bei einigen Versuchen wurden Langlöcher verwendet, sodass die vom Kerbfallkatalog geforderte Verbindung mit Passschrauben nicht vorlag.

Die statistische Auswertung der stark gefilterten experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 82 und liegt damit leicht unter dem Kerbfall 90 der DIN EN 1993-1-9 [1], vergleiche Bild 6-15. Diese Kerbfallableitung beruht jedoch auf einer einzigen Quelle.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 82 [N/mm²]

Bild 6-15: Kerbfallableitung „Zweischnittige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionschrauben“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen ID: #011)

Figure 6-15: Fatigue classification of “Double covered joint with fitted or non-preloaded injection bolts “ based on selected test results

6.1.7 Bauteile mit Löchern – Detail 11

Structural elements with holes – Detail 11

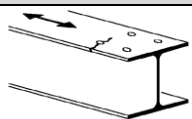
6.1.7.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der Bauteile mit Löchern nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-11 dargestellt.

Tabelle 6-11: Bauteile mit Löchern nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-11: Structural elements with holes according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
90		Bauteile mit Löchern unter Biegung und Normalkraft.	$\Delta\sigma$ ist am Nettoquerschnitt zu ermitteln. Einhaltung bestimmter Lochabstände

6.1.7.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten Bauteile mit Löchern

Available experimental test data structural elements with holes

Für das Detail „Bauteile mit Löchern“ sind wenige Quellen bekannt, die jedoch eine Vielzahl an Wöhlerversuchen enthalten, wie Tabelle 6-12 zeigt.

Tabelle 6-12: Übersicht Datengrundlage: „Bauteile mit Löchern“

Table 6-12: Overview database: “Structural element with holes”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	242
Anzahl Quellen	4
Anzahl Serien	24

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Bauteile mit Löchern“ ist in Bild 6-16 dargestellt.

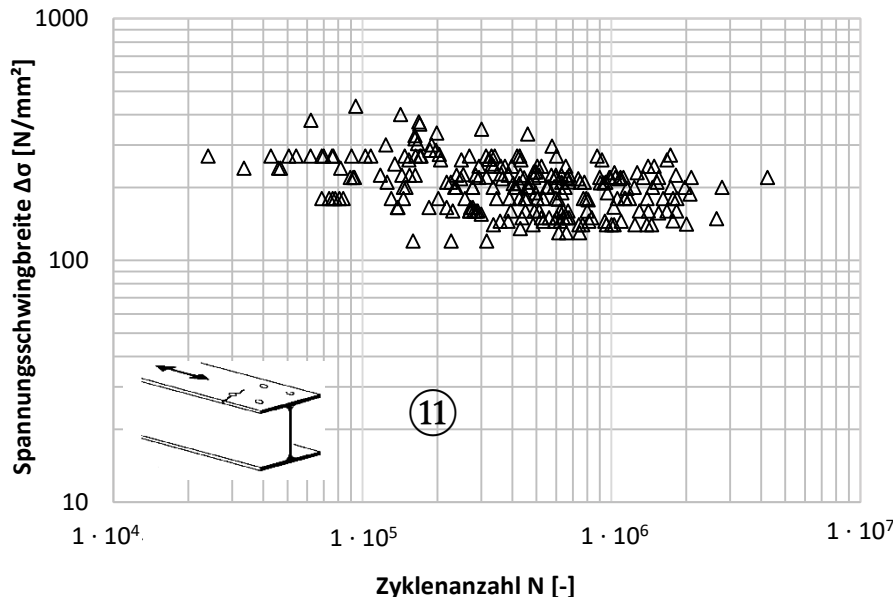


Bild 6-16: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Bauteile mit Löchern“ #007 #280 #012 #1001

Figure 6-16: Illustration of experimental fatigue data for detail “structural element with holes”

Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

6.1.7.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Das Versagen der auf Ermüdung getesteten Bauteile mit Löchern ging typischer Weise vom Bohrloch aus, wie Bild 6-17 zeigt.

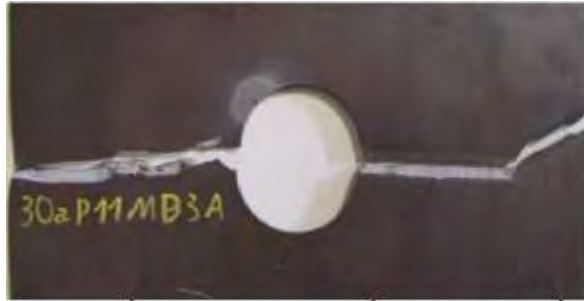


Bild 6-17: Probekörper mit Ermüdungsriss am Bohrloch #1001

Figure 6-17: Specimen with fatigue crack at the bore hole #1001

6.1.7.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

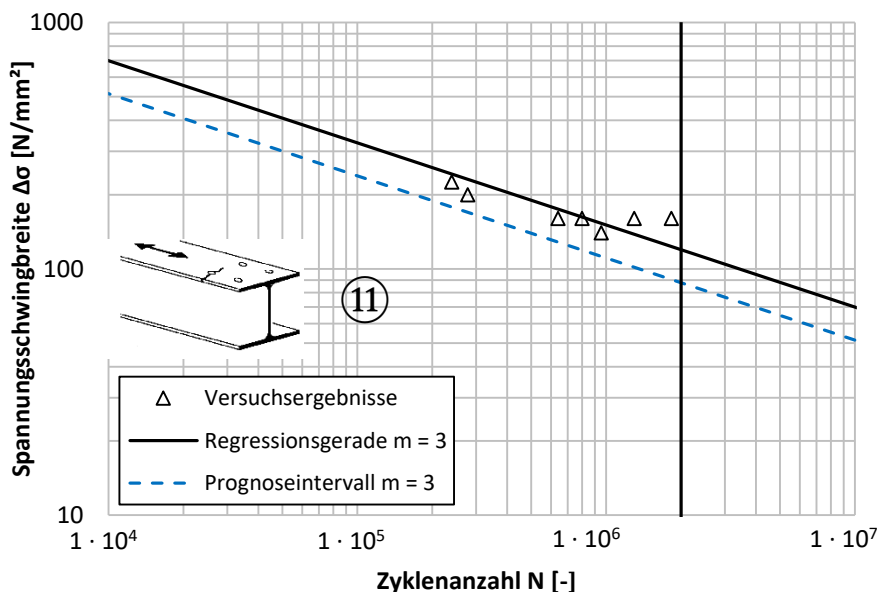
Significant influence parameters on the resistance side

Auch bei Bauteilen mit Löchern weisen Probekörper mit gebohrten Löchern eine höhere Ermüdungsfestigkeit als Bauteile mit gestanzten Löchern auf. Das Feuerverzinken wirkt sich bei gelochten Blechen negativ auf die Ermüdungsfestigkeit aus. Ebenfalls spielt das Spannungsverhältnis eine große Rolle #007. In #280 wurden gelochte Bleche getestet, wobei das Loch verschraubt und die Schraube vorgespannt wurde. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Vorspannung eine Steigerung der Lebensdauer nach sich zieht.

6.1.7.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Beim Detail „Bauteile mit Löchern“ wurde ein Großteil der Ermüdungsversuche von der Auswertung ausgeschlossen. Dies lag vor allem an Serien, bei denen vorgespannte Schrauben in den Löchern vorhanden waren. Die Vorspannung ist im Kerbfallkatalog nicht vorgesehen und hat einen positiven Effekt auf die Ermüdungsfestigkeit. Außerdem wurden feuerverzinkte Bauteile ausgeschlossen. Da das Spannungsverhältnis einen großen Einfluss auf die Lebensdauer hat, wurden nur Versuche mit $R = 0,1$ für die Auswertung berücksichtigt. Die statistische Auswertung der stark gefilterten experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 88 und bestätigt damit Kerbfall 90 der DIN EN 1993-1-9 [1], vergleiche Bild 6-18.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 88 [N/mm²]

Bild 6-18: Kerbfallableitung „Bauteile mit Löchern“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #007, #280)

Figure 6-18: Fatigue classification of “Structural element with holes” based on selected test results

6.1.8 Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben – Detail 13

Connection with non-preloaded bolts in normal clearance holes – Detail 13

6.1.8.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der einschnittigen oder symmetrischen zweischnittigen Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-13 dargestellt.

Tabelle 6-13: Einschnittige oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-13: One sided or double covered symmetrical connection with non-preloaded bolts in normal clearance holes according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
50		Einschnittige oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben	$\Delta\sigma$ ist am Nettoquerschnitt zu ermitteln. Einhaltung bestimmter Lochabstände

6.1.8.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Einschnittige oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben“ ist nur eine Quelle bekannt, die sechs verschiedene Serien und 78 Wöhlerversuche enthält, wie Tabelle 6-14 zeigt.

Tabelle 6-14: Übersicht Datengrundlage: „Einschnittige oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben“

Table 6-14: Overview database: “One sided or double covered symmetrical connection with non-preloaded bolts in normal clearance holes”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	78
Anzahl Quellen	1
Anzahl Serien	6

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Einschnittige oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben“ ist in Bild 6-19 dargestellt.

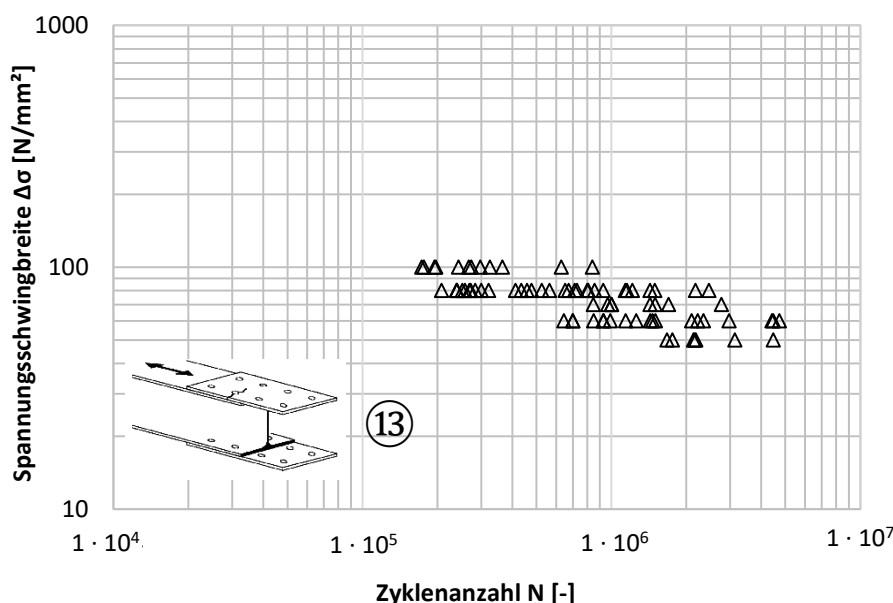


Bild 6-19: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Einschnittige oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben“ #007

Figure 6-19: Illustration of experimental fatigue data for detail “One sided or double covered symmetrical connection with non-preloaded bolts in normal clearance holes”

Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt. Hierbei ist zu erwähnen, dass es sich bei allen Serien um symmetrische zweischnittige Verbindungen mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben handelt.

6.1.8.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Das Versagen der auf Ermüdung getesteten einschnittigen oder symmetrischen zweischnittigen Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben ging typischer Weise vom Bohrloch aus #007.

6.1.8.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

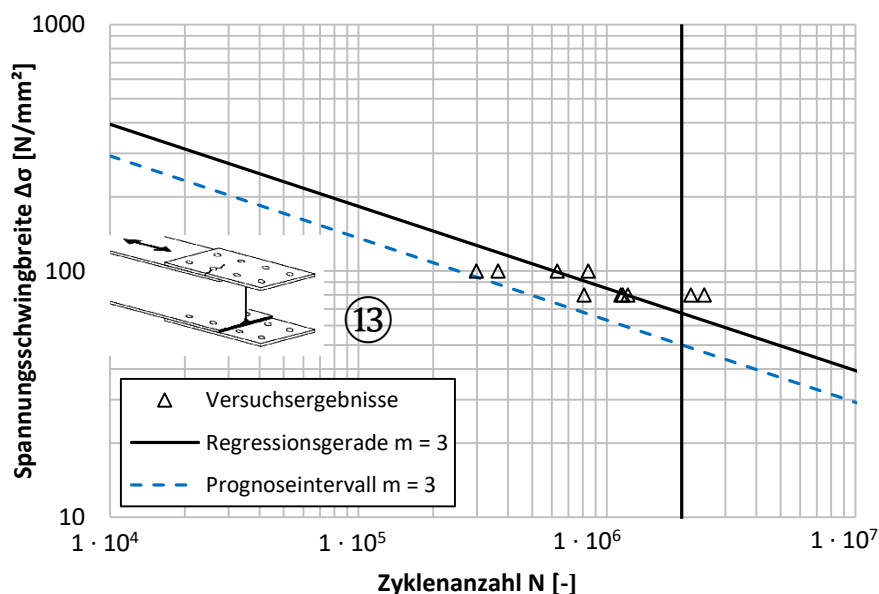
Auch bei Verbindungen mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben hat sowohl das Feuerverzinken als auch das Stanzen von Löchern einen negativen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit #007.

6.1.8.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Bei den Versuchsserien der Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben wurden jene Serien aussortiert, bei denen die Bleche feuerverzinkt wurden oder abweichende Spannungsverhältnisse als $R = 0,1$ aufgebracht wurden.

Die statistische Auswertung der stark gefilterten experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 50 und bestätigt damit Kerbfall 50 der DIN EN 1993-1-9 [1], vergleiche Bild 6-20.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 50 [N/mm²]

Bild 6-20: Kerbfallableitung „Einschnittige oder symmetrische zweiseitige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen ID: #007)

Figure 6-20: Fatigue classification of “One sided or double covered symmetrical connection with non-pre-loaded bolts in normal clearance holes” based on selected test results

6.1.9 Schrauben und Gewindestangen unter Zug – Detail 14

Bolts and rods in tension – Detail 14

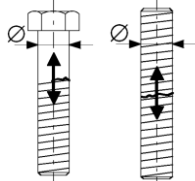
6.1.9.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der Schrauben und Gewindestangen unter Zug nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-15 dargestellt.

Tabelle 6-15: Schrauben und Gewindestangen unter Zug nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-15: Bolts and rods in tension according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
50	<p>Größenabhängigkeit für $\varnothing > 30$ mm: $k_s = \left(\frac{30}{\varnothing}\right)^{0,25}$</p> 	Schrauben und Gewindestangen mit gerolltem oder geschnittenem Gewinde unter Zug.	$\Delta\sigma$ ist am Spannungsquerschnitt zu ermitteln. Biegung und Zug infolge Abstützkräften sowie weitere Biegespannungen sind zu berücksichtigen. Bei vorgespannten Schrauben darf die reduzierte Spannungsschwingbreite berücksichtigt werden.

6.1.9.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Schrauben und Gewindestangen unter Zug“ sind zahlreiche und vor allem auch neuere Quellen bekannt, wie Tabelle 6-16 zeigt.

Tabelle 6-16: Übersicht Datengrundlage: „Schrauben und Gewindestangen unter Zug“

Table 6-16: Overview database: “Bolts and rods in tension”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	442
Anzahl Quellen	16
Anzahl Serien	45

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Schrauben und Gewindestangen unter Zug“ ist in Bild 6-21 dargestellt.

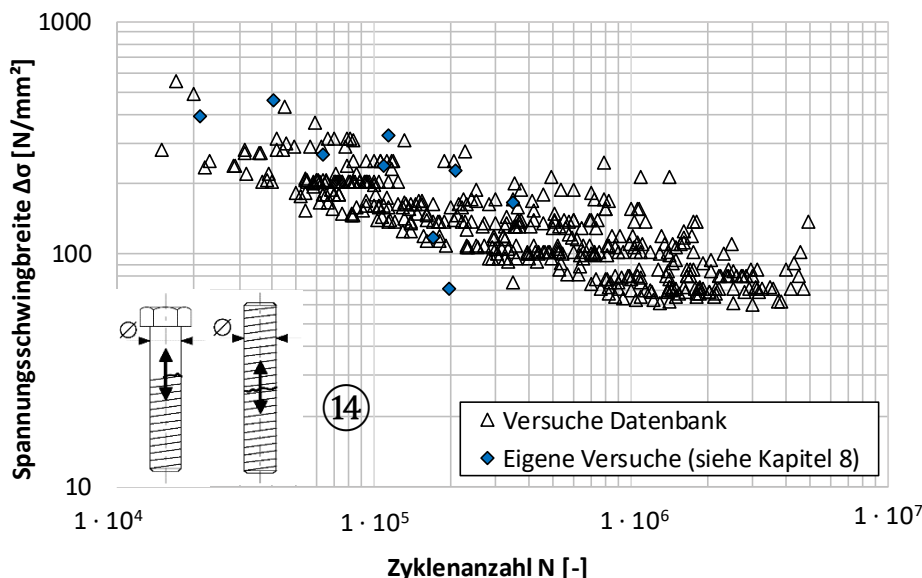


Bild 6-21: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Schrauben und Gewindestangen unter Zug“ #008 #013 #014 #015 #016 #017 #374 #375 #376 #377 #378 #379 #380 #381 #382 #383

Figure 6-21: Illustration of experimental fatigue data for detail “bolts and rods in tension”

Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

6.1.9.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Der Bruch bei Schrauben und Gewindestangen unter Zug tritt üblicherweise im Gewinde auf.

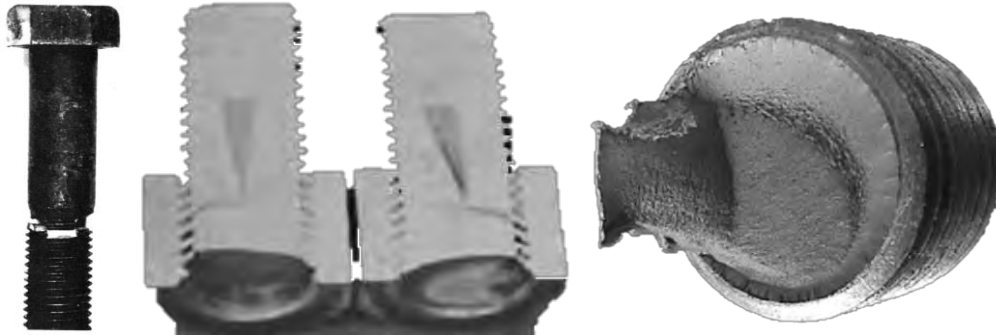


Bild 6-22: Probekörper mit Ermüdungsrissen im Gewinde #008 #017 #374 (v.l.n.r)

Figure 6-22: Specimen with fatigue crack in thread #008 #017 #374 (f.l.t.r.)

Dabei geht der Riss vom ersten tragenden Gewinde aus #016. Vereinzelt sind auch Brüche am Übergang vom Schraubenschaft zum Schraubenschaft dokumentiert #008. Bild 6-22 zeigt einige Bruchbilder an Schrauben und Gewindestangen unter Zug.

6.1.9.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

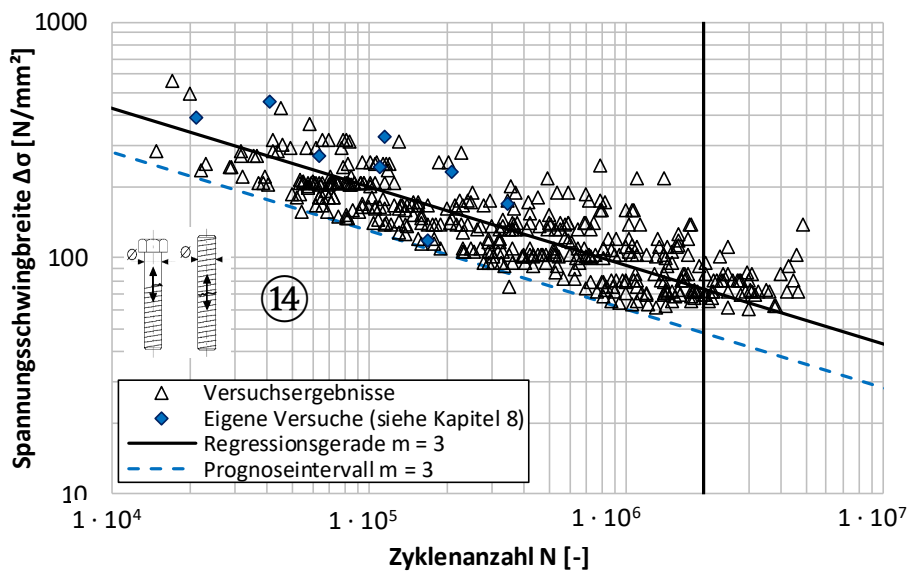
Significant influence parameters on the resistance side

Bei Schrauben und Gewindestangen unter Zug gibt es einige Einflussparameter, die für die Ermüdungsfestigkeit eine Rolle spielen. Ein Größeneinfluss ist erkennbar #381, stellt sich aber in vielen Fällen nicht als signifikant heraus #013 #017. Weiterhin ist die Herstellart des Gewindes ein Einflussfaktor. Bei der Herstellung des gerollten Gewindes werden im Vergleich zum geschnittenen Gewinde Druckeigenstressungen in das Gewinde eingebracht, die einen positiven Effekt auf die Ermüdungsfestigkeit der Schraube haben können. Dieser Effekt ist aber nur signifikant, wenn das Gewinde erst nach der Wärmebehandlung der Schraube gefertigt wird, wenn die Schraube also schlussgerollt wird #013. Zudem hat die Feuerverzinkung der Schraube einen negativen Einfluss #016 #383. Wenn jedoch das Feuerverzinken vor dem Rollen des Gewindes stattfindet, geht der negative Einfluss verloren #376. Es konnte auch ein leicht negativer Einfluss von höherfesten Material festgestellt werden #017. Einige Untersuchungen betreffen Schrauben in Verbindungen. Hier spielen Imperfektionen, die sich auf die Kontaktfläche der überdrückten Bauteile auswirken, eine sehr große Rolle auf die Spannungsschwingbreite in der Schraube und somit auf die Ermüdungsfestigkeit. Je größer die Vorspannung, desto höher ist die Lebensdauer der Schraube #015.

6.1.9.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Bei den Versuchsserien der Schrauben und Gewindestangen unter Zug wurden jene Serien aussortiert, bei denen spezielle Schraubensysteme verwendet wurden, wie z.B. Schließringbolzensysteme.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 48 [N/mm²] (ohne Berücksichtigung Größeneffekt)

Bild 6-23: Kerbfalleitung „Schrauben und Gewindestangen unter Zug“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #008 #013 #014 #015 #016 #017 #374 #375 #376 #379 #380 #381 #382 #383)

Figure 6-23: Fatigue classification of “Bolts and rods in tension” based on selected test results

Außerdem wurden ausgewählte Serien an Schraubenverbindungen aussortiert, bei denen große Vorspannverluste auftraten, sodass die Anfangsspannungsschwingbreite nicht als aussagekräftig angesehen werden kann. Die statistische Auswertung der gefilterten experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 48 und bestätigt damit Kerbfall 50 der DIN EN 1993-1-9 [1], vergleiche Bild 6-23.

6.1.10 Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen – Detail 15

Bolts in shear – Detail 15

6.1.10.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-17 dargestellt.

Tabelle 6-17: Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-17: Bolts in shear according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
100 $m = 5$		Schrauben in ein- oder zweiseitigen Scher-Lochleibungsverbindungen (Gewinde nicht in der Scherfläche) <ul style="list-style-type: none"> • Passschrauben • Schrauben ohne Lastumkehr (Schraubengüten 5.6, 8.8 oder 10.9)	$\Delta\tau$ ist am Schaftquerschnitt zu ermitteln.

6.1.10.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen“ sind nur wenige Quellen bekannt, wie Tabelle 6-18 zeigt.

Tabelle 6-18: Übersicht Datengrundlage: „Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen“

Table 6-18: Overview database: "Bolts in shear"

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	41
Anzahl Quellen	2
Anzahl Serien	5

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen“ ist in Bild 6-24 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt. Dabei fällt die enorme Streuung der Versuchspunkte auf.

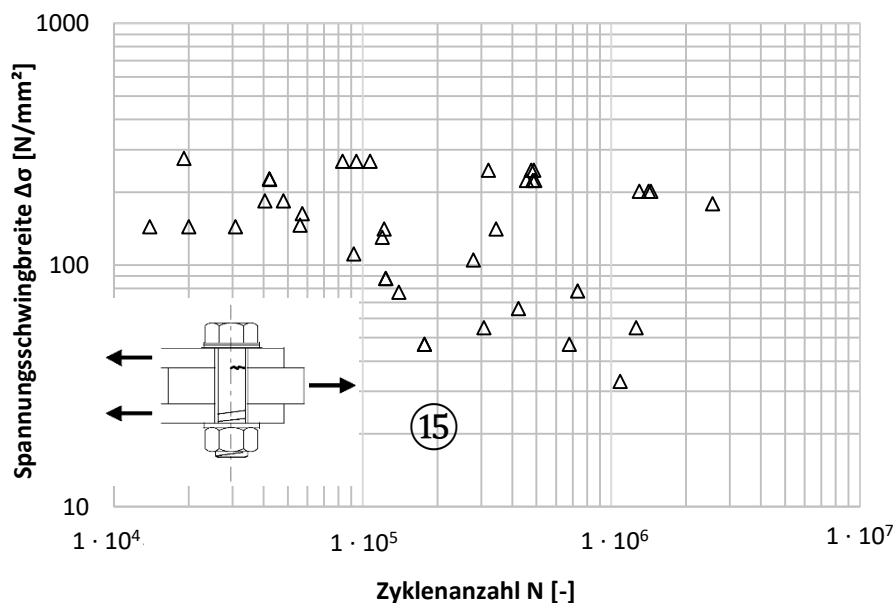


Bild 6-24: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen“ #013 #384

Figure 6-24: Illustration of experimental fatigue data for detail "bolts in shear"

6.1.10.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Das Versagen der auf Schub beanspruchten Schrauben trat durch Abscheren des Schraubenschaftes ein #384. Bild 6-25 zeigt ein Bruchbild einer Schraube #013.



Bild 6-25: Schraube mit Ermüdungsriß #013

Figure 6-25: Bolt with fatigue crack #013

6.1.10.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

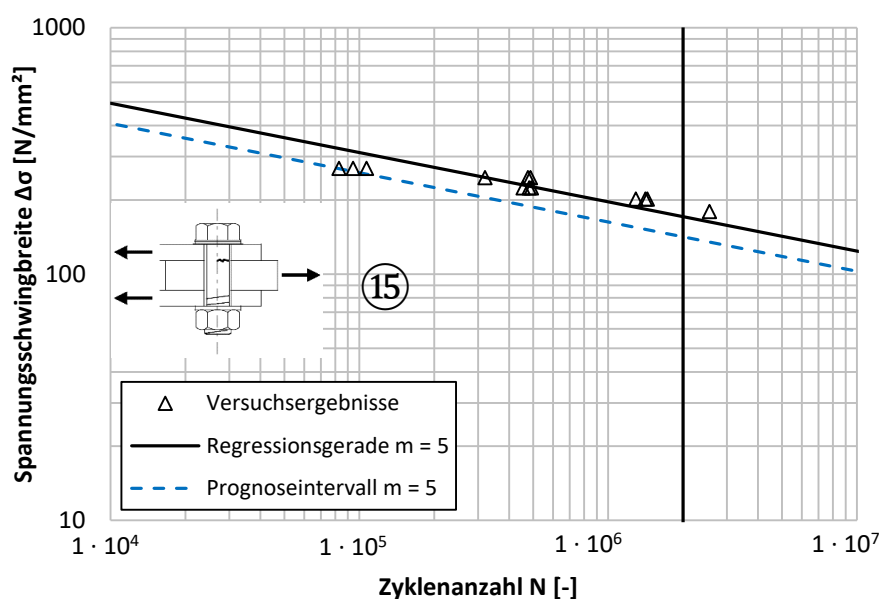
Significant influence parameters on the resistance side

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen zu auf Schub beanspruchten Schraube wurden nicht viele Einflussparameter untersucht. Was jedoch eine entscheidende Rolle zu spielen scheint ist, ob sich das Gewinde der Schraube in der Scherfläche befindet. Wenn dies der Fall ist, wird die Ermüdungsfestigkeit der Schrauben deutlich herabgesetzt.

6.1.10.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Bei den Versuchsserien der Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen wurden jene Serien aussortiert, bei denen das Gewinde in der Scherfläche liegt. Wie in Tabelle 6-17 erwähnt ist, darf das Gewinde nicht in der Scherfläche liegen.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 142 [N/mm²]

Bild 6-26: Kerbfallableitung „Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen ID: #384)

Figure 6-26: Fatigue classification of “Bolts in shear” based on selected test results

Die statistische Auswertung der gefilterten experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 142 und liegt damit oberhalb von Kerbfall 100 der DIN EN 1993-1-9 [1], vergleiche Bild 6-26, basiert jedoch auf einer einzigen Quelle.

6.2 Geschweißte zusammengesetzte Bauteile – Tabelle 8.2

Welded built-up sections – Table 8.2

6.2.1 Übersicht

Overview

Tabelle 8.2 der DIN EN 1993-1-9 [1] regelt die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten, zusammengesetzten Querschnitten. Dies umfasst längsbeanspruchte Nähte, die in der

Tabelle nach Herstellung und Beschaffenheit der Schweißnaht unterschiedlich kategorisiert sind. Außerdem gibt es auch Kerbfälle für unterbrochene Längsnähte und Längsnähte in Hohlprofilen.

6.2.2 Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen – Detail 2

Automatic fillet welds without stop/start positions – Detail 2

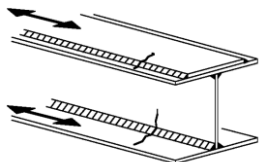
6.2.2.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-19 dargestellt.

Tabelle 6-19: Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-19: Automatic fillet welds without stop/start positions according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
125		Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte	Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein, ausgenommen bei Durchführung einer Reparatur mit anschließender Überprüfung der Reparaturschweißung.

6.2.2.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen“ sind die in Tabelle 6-20 gezeigten Daten bekannt.

Tabelle 6-20: Übersicht Datengrundlage: „Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen“

Table 6-20: Overview database: “Automatic fillet welds without stop/start positions”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	58
Anzahl Quellen	5
Anzahl Serien	6

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen“ ist in Bild 6-27 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

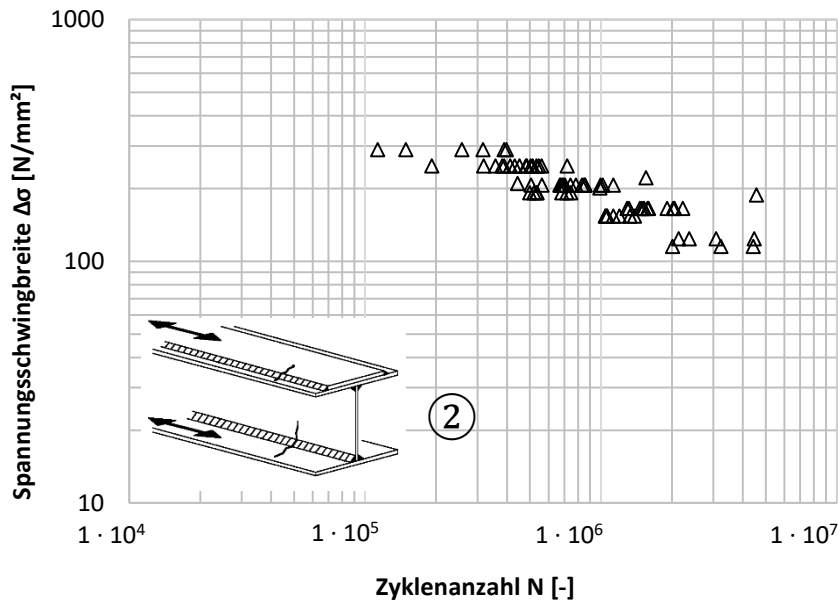


Bild 6-27: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen“ #025 #028 #029 #030 #031 #032

Figure 6-27: Illustration of experimental fatigue data for detail “automatic fillet welds without stop/start positions”

6.2.2.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Das Versagen der auf Ermüdung getesteten Längsnähte ging in den meisten Fällen vom Schweißnahtübergang aus, wie Bild 6-28 zeigt. Dabei startet der Riss an Schlauchporen, Porositäten oder an Fehlstellen in der Nähe von Heftschweißungen oder Schweißreparaturen #025 #028 #030.

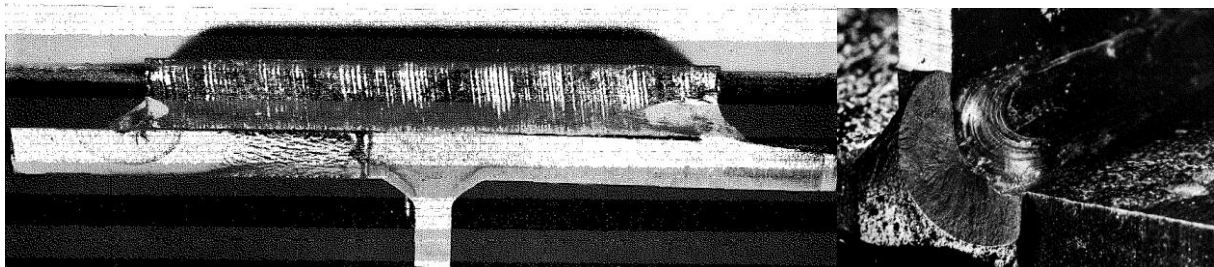


Bild 6-28: Probekörper mit Ermüdungsrissen an der Längsnaht (v.l.n.r.) #028 #032

Figure 6-28: Specimens with fatigue cracks in longitudinal welds (f.l.t.r) #028 #032

6.2.2.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

Die Ermüdungsfestigkeit von mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißten Kehlnähten ohne Ansatzstellen hängt maßgeblich von der Spannungsschwingbreite ab. Andere potenzielle Einflussparameter, wie z.B. der Streckgrenzeinfluss, haben sich, wie in den vorhandenen Quellen dokumentiert, nicht als signifikant herausgestellt #028 #031.

6.2.2.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Das Detail „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen“ beinhaltet sowohl Längsnähte ohne Ansatzstellen als auch Nähte mit reparierten Schweißnahtansatzstellen. Bei einigen Quellen, in denen Ermüdungsversuche an reparierten Längsnähten dokumentiert sind, ist jedoch unklar mit welcher Qualität die Reparaturschweißung durchgeführt wurde. DIN EN 1993-1-9 [1] fordert an dieser Stelle „durch Nachschleifen aller sichtbaren Fehlstellen durch einen Spezialisten sowie einer entsprechenden Überprüfung kann der ursprüngliche Kerbfall wiederhergestellt werden.“ Da unklar ist, ob die Serien mit reparierten Ansatzstellen dieser Anforderung genügen, wurden jene Serien nicht mit in die Auswertung einbezogen.

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 127 und bestätigt damit die derzeit gültigen Kerbfallklasse 125 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-29.

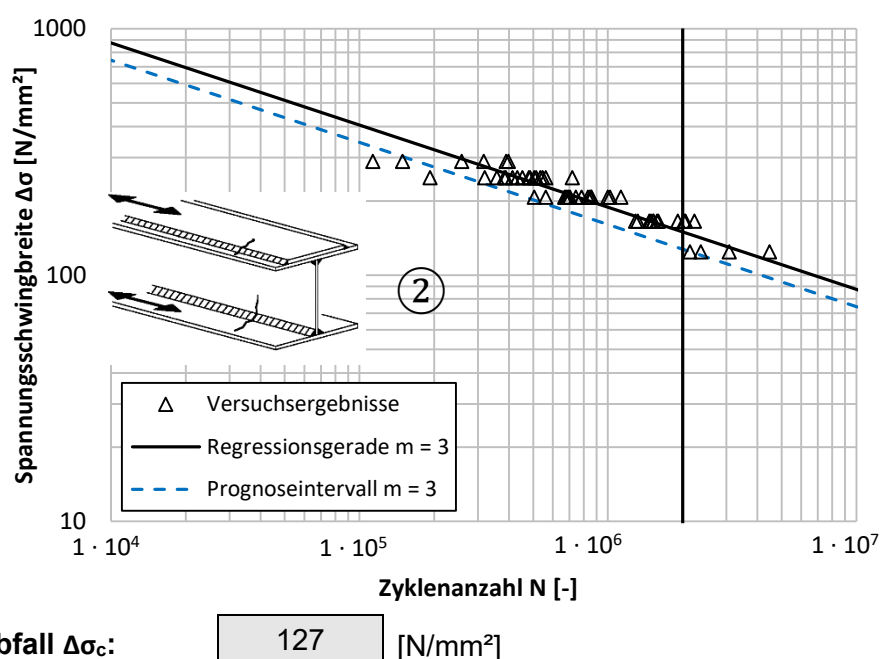


Bild 6-29: Kerbfallableitung „Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #028 #029)

Figure 6-29: Fatigue classification of „Automatic fillet welds without stop/start positions“ based on selected test results

6.2.3 Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen – Detail 3

Automatic fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions – Detail 3

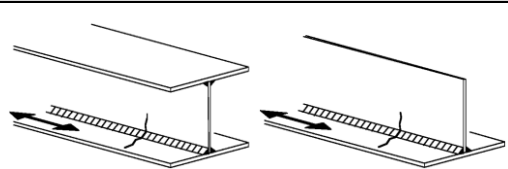
6.2.3.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißten Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißten Nähte mit Ansatzstellen nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-21 dargestellt.

Tabelle 6-21: Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-21: Automatic fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung
112		Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte, beide mit Ansatzstellen.

6.2.3.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen“ sind sehr viele Daten bekannt, wie Tabelle 6-22 zeigt.

Tabelle 6-22: Übersicht Datengrundlage: „Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen“

Table 6-22: Overview database: „Automatic fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions“

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	364
Anzahl Quellen	13
Anzahl Serien	30

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen“ ist in Bild 6-30 dargestellt.

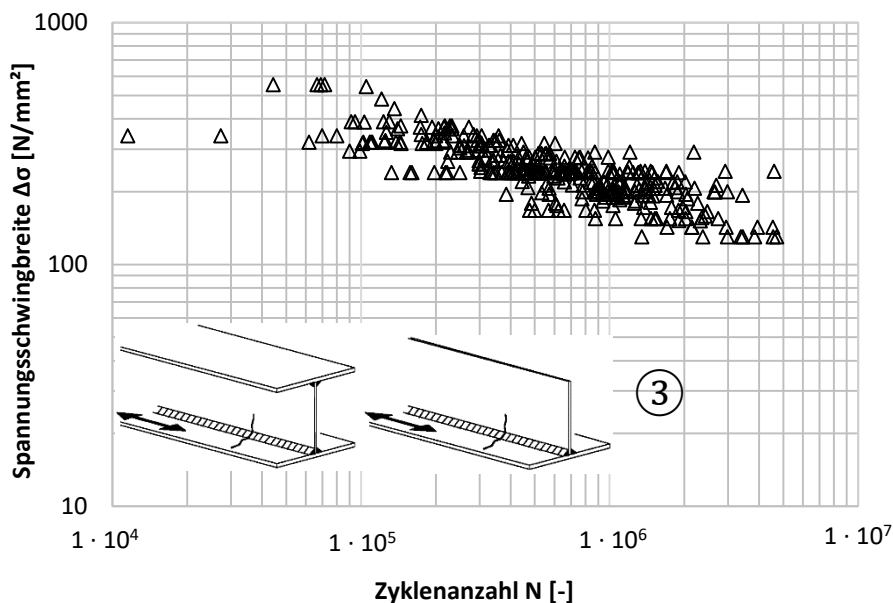


Bild 6-30: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen“ #018 #019 #020 #021 #022 #0224 #025 #026 #027 #039 #040 #085 #282

Figure 6-30: Illustration of experimental fatigue data for detail “Automatic fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions”

Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

6.2.3.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Das Versagen der auf Ermüdung getesteten Längsnähte ging in den meisten Fällen vom Schweißnahtübergang aus, wie Bild 6-31 zeigt #019 #027 #039 #040. Risse können von Fehlstellen oder Ansatzstellen ausgehen, jedoch sind Ansatzstellen nicht zwingend Riss-initiierungsstellen #025.

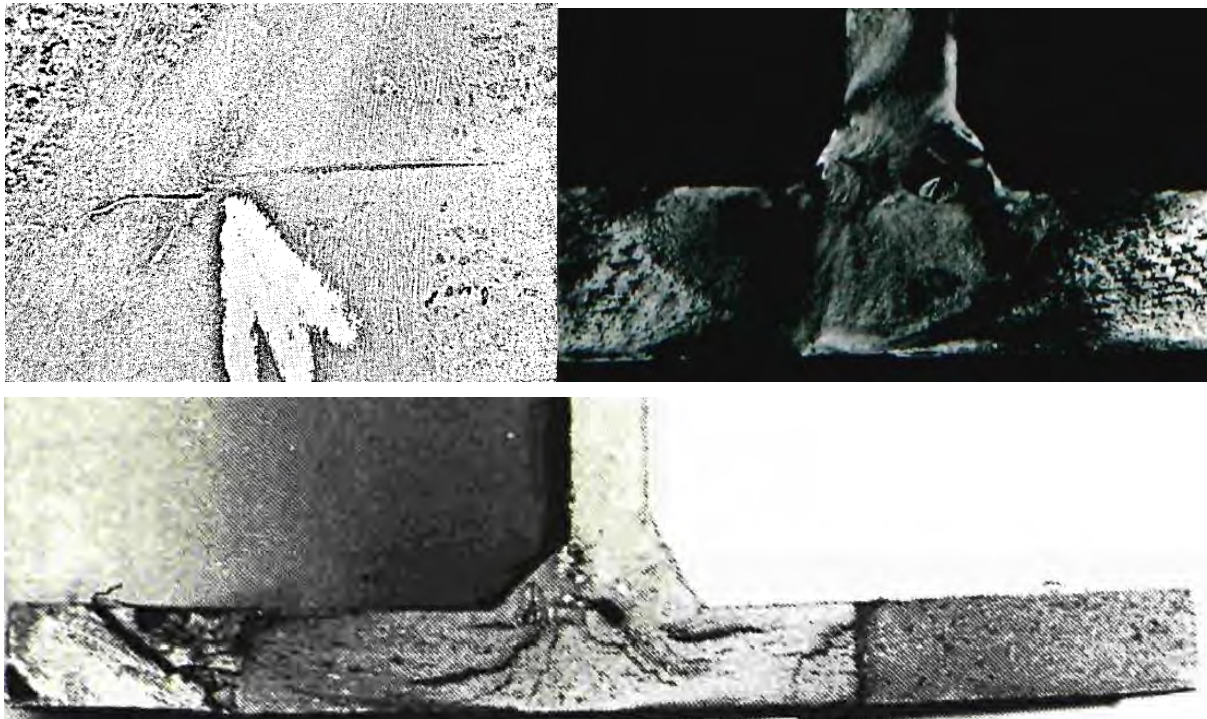


Bild 6-31: Probekörper mit Ermüdungsrissen an der Längsnaht (v.l.o.n.r.u.) #026 #040 #039

Figure 6-31: Specimens with fatigue cracks in longitudinal welds (f.t.l.t.b.r.) #026 #040 #039

6.2.3.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

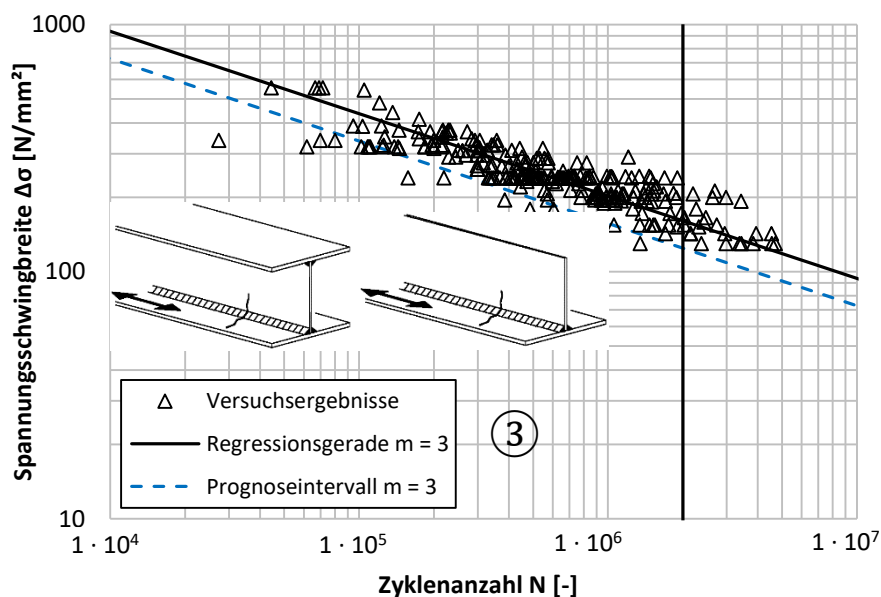
Die Ermüdungsfestigkeit von „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähten oder beidseitig durchgeschweißten Nähten mit Ansatzstellen“ wird maßgeblich nur von der Spannungsschwingbreite beeinflusst #085. Verschiedene Schweißverfahren erwiesen sich als gleichwertig in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit #022 #025. Spannungsarmglühen von Längsnähten mit Ansatzstellen hat einen positiven Einfluss, da ungünstige Eigenspannungszustände abgebaut werden #039.

6.2.3.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

In einigen Versuchsserien zum Konstruktionsdetail „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen“ wurden die Schweißnähte nachbehandelt, z.B. spannungsarm geglüht, sodass diese von der Auswertung ausgeschlossen wurden. Bei vereinzelten Serien war der Ort der Spannungsschwingbreite nicht dokumentiert, sodass die Aussagekraft der Versuche nicht gegeben war. Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse

liefert Kerbfall 124 und liegt über der derzeit gültigen Kerbfallklasse 112 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-32.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 124 [N/mm²]

Bild 6-32: Kerbfallableitung „Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #019 #020 # 021 #022 #040 #085)

Figure 6-32: Fatigue classification of “Automatic fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions” based on filtered test results

6.2.4 Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte – Detail 5

Manual fillet or butt weld – Detail 5

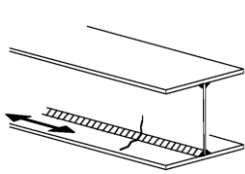
6.2.4.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der handgeschweißten Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-23 dargestellt.

Tabelle 6-23: Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-23: Manual fillet or butt weld according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderung
100		Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte.	Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Passgenauigkeit erforderlich. Dabei ist bei HV-Nähten das Stegblech so anzuschrägen, dass die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann.

6.2.4.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte“ sind einige Daten bekannt, wie Tabelle 6-24 zeigt.

Tabelle 6-24: Übersicht Datengrundlage: „Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte“

Table 6-24: Overview database: „Manual fillet or butt weld“

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	69
Anzahl Quellen	8
Anzahl Serien	12

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte“ ist in Bild 6-33 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

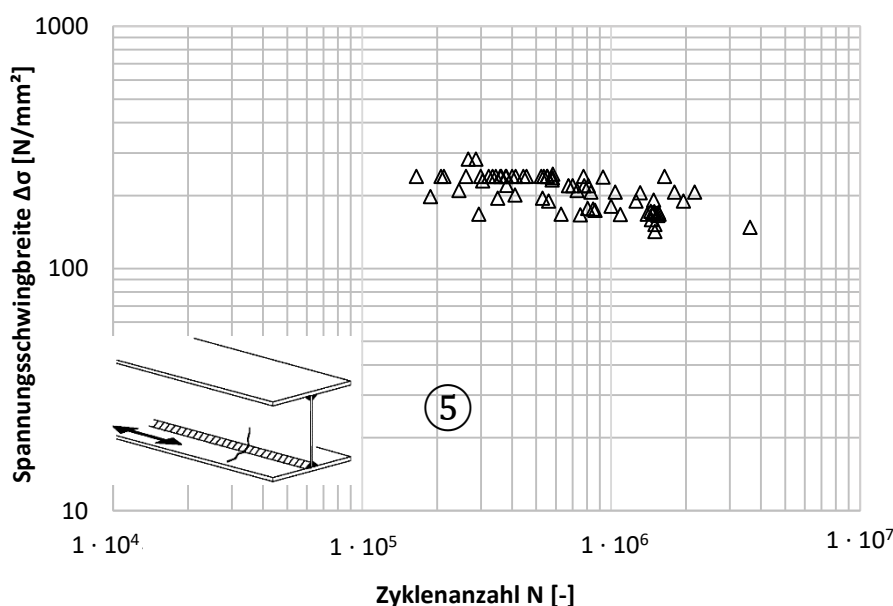


Bild 6-33: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte“ #018 #022 #025 #037 #038 #039 #282 #285

Figure 6-33: Illustration of experimental fatigue data for detail “Manual fillet or butt weld”

6.2.4.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Probekörper mit handgeschweißten Nähten versagten überwiegend am Anschluss vom Flansch an den Steg an der Schweißnahtoberfläche. Oft ist der Rissinitiiierungspunkt eine Fehl- oder Ansatzstelle #025 #037 #285.



Bild 6-34: Probekörper mit Ermüdungsrissen an der Längsnaht (v.l.n.r.) #025 #039

Figure 6-34: Specimens with fatigue cracks in longitudinal welds (f.l.t.r.) #025 #039

6.2.4.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

Die Ermüdungsfestigkeit von „handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte“ hängt wie bei den anderen Längsnähten größtenteils nur von der aufgetragenen Spannungsschwingbreite ab. Das Vorhandensein von Ansatzstellen führt zur Rissinitiierung und beeinflusst damit die Lebensdauer. Vereinzelt konnte festgestellt werden, dass bei größerem Flansch-zu-Steg-Dickenverhältnis eine längere Lebensdauer resultiert #285.

6.2.4.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

In einigen Versuchsserien zum Konstruktionsdetail „handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte“ war das Versagenskriterium gänzlich unbekannt oder es lagen nur Sekundärquellen mit graphischen Daten vor, sodass diese von der Auswertung ausgeschlossen wurden.

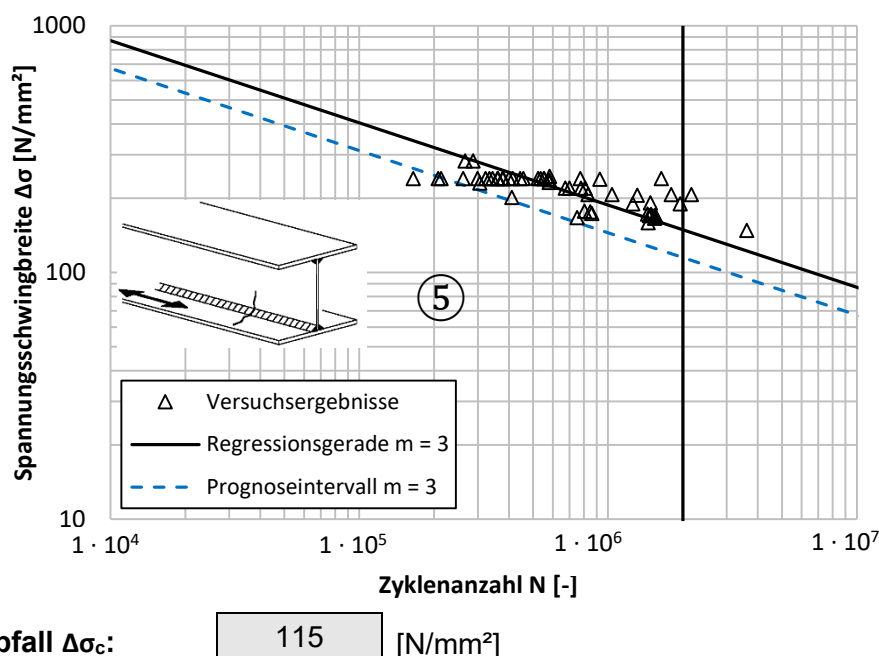


Bild 6-35: Kerbfallableitung „Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #022 #025 #037 #039 #285)

Figure 6-35: Fatigue classification of „Manual fillet or butt weld“ based on selected test results

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 115 und liegt damit über der derzeit gültigen Kerbfallklasse 100 in DIN EN 1993-1-9 [1]. Folglich wäre eine Klassifizierung in Kerbfallklasse 112 möglich.

6.2.5 Unterbrochene Längsnähte – Detail 8

Intermittent longitudinal fillet welds – Detail 8

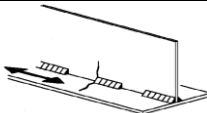
6.2.5.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der unterbrochenen Längsnähte nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-25 dargestellt.

Tabelle 6-25: Unterbrochene Längsnähte nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-25: Intermittent longitudinal fillet welds according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderung
80		Unterbrochene Längsnähte	$\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.

6.2.5.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „unterbrochene Längsnähte“ sind wenige Daten bekannt, wie Tabelle 6-26 zeigt.

Tabelle 6-26: Übersicht Datengrundlage: „Unterbrochene Längsnähte“

Table 6-26: Overview database: “Intermittent longitudinal fillet welds”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	39
Anzahl Quellen	3
Anzahl Serien	8

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „unterbrochene Längsnähte“ ist in Bild 6-36 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

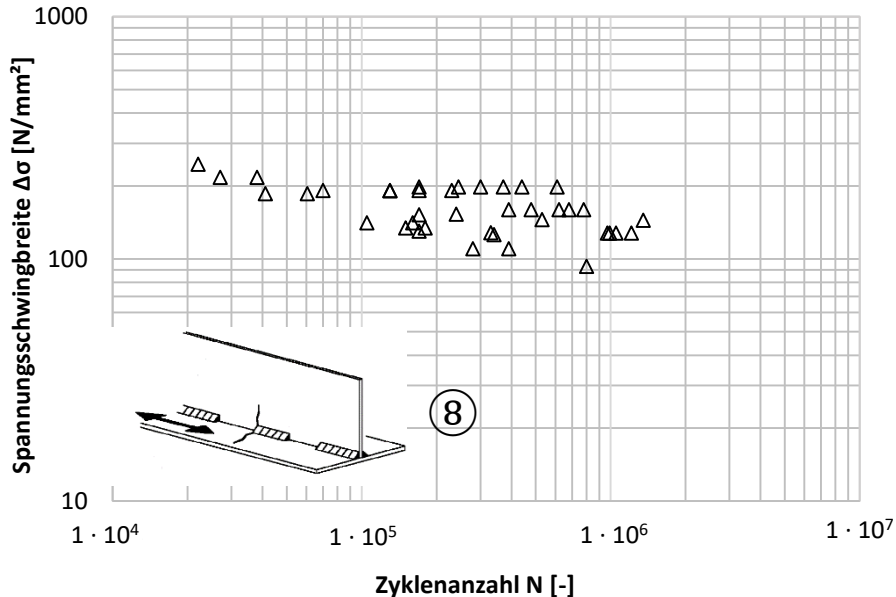


Bild 6-36: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Unterbrochene Längsnähte“ #018 #35 #284

Figure 6-36: Illustration of experimental fatigue data for detail “Intermittent longitudinal fillet welds”

6.2.5.3 Versagensmerkmale

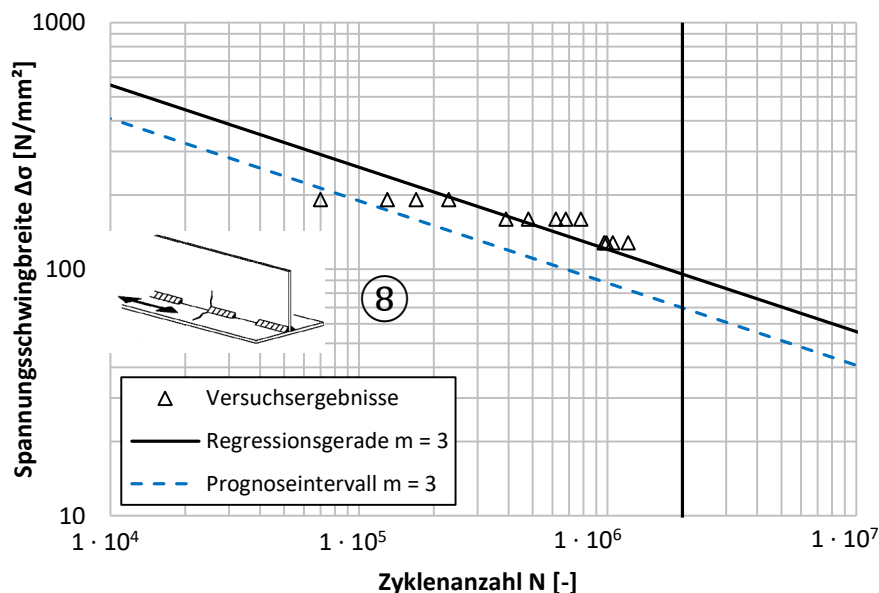
Failure characteristics

Bei den Versuchen an unterbrochenen Längsnähte initiierten Ermüdungsrisse eher an einer Imperfektion als an den Enden der unterbrochenen Nähte #284.

6.2.5.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

In einigen Versuchsserien zum Konstruktionsdetail „unterbrochene Längsnähte“ war der Ort der Spannungsermittlung nicht bekannt. Aus diesem Grund wurden diese Serien von der Auswertung ausgeschlossen.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 70 [N/mm²]

Bild 6-37: Kerbfallableitung „Unterbrochene Längsnähte“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen ID: #035)

Figure 6-37: Fatigue classification of “Intermittent longitudinal fillet welds” based on filtered test results

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 70 und liegt damit unterhalb der derzeit gültigen Kerbfallklasse 80 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-37. Folglich wäre eine Klassifizierung in Kerbfallklasse 71 sinnvoll.

6.2.6 Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten – Detail 9

Longitudinal butt weld, fillet weld or intermittent weld with a cope hole – Detail 9

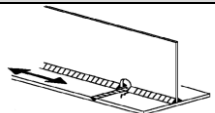
6.2.6.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochenen Nähte mit Freischnitten nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-27 dargestellt.

Tabelle 6-27: Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-27: Longitudinal butt, fillet or intermittent weld with a cope hole according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderung
71		Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten	$\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Flansch berechnet.

6.2.6.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten“ sind wenige Daten bekannt, wie Tabelle 6-26 zeigt.

Tabelle 6-28: Übersicht Datengrundlage: „Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten“

Table 6-28: Overview database: „Longitudinal butt weld, fillet weld or intermittent weld with a cope hole“

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	36
Anzahl Quellen	3
Anzahl Serien	7

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten“ ist in Bild 6-38 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

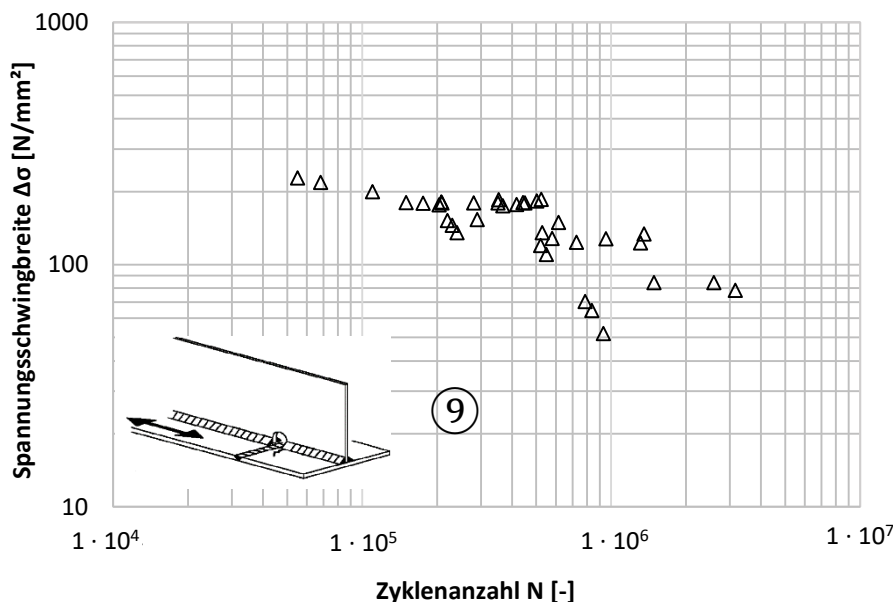


Bild 6-38: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten“ #018 #012 #285

Figure 6-38: Illustration of experimental fatigue data for detail „Longitudinal butt weld, fillet weld or intermittent weld with a cope hole“

6.2.6.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Bild 6-39 zeigt ein Versagensbild eines Probekörpers mit Freischnitt.

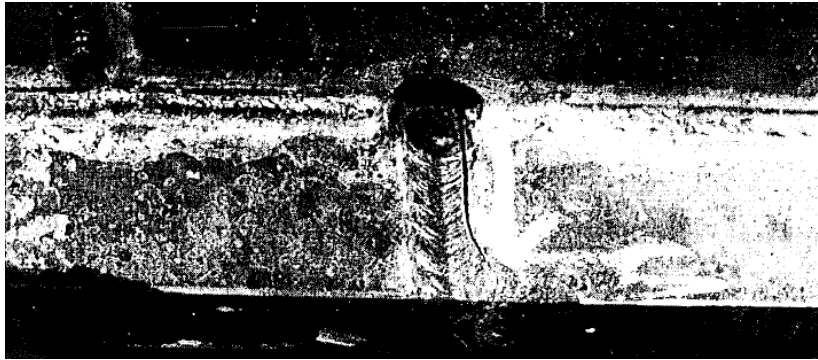


Bild 6-39: Probekörper mit Ermüdungsrissen am Freischnitt #285

Figure 6-39: Specimens with fatigue cracks at cope hole #285

Bei einigen Probekörpern begann der Riss am Schweißnahtübergang der Kehlnaht an der Kante des Freischnitts. Ein anderes Versagensmerkmal stellt die Rissinitiierung am Schweißnahtübergang der Stumpfnah im Flansch oder durch die Stumpfnah im Flansch dar. Beim dritten möglichen Versagensmechanismus ging der Riss von der Nut zwischen zwei parallelen Flächendurchgängen der Flanschstoßverbindung aus #285.

6.2.6.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

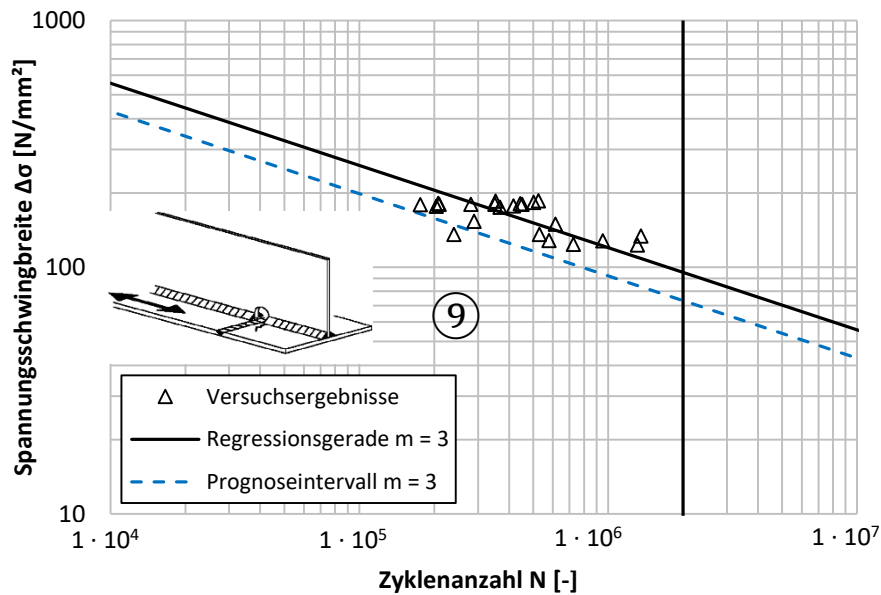
In Bezug auf Längsnähte mit Freischnitten wurden nicht viele Einflussparameter analysiert. In einer Untersuchung konnte festgestellt werden, dass Träger, in denen nicht nur im Flansch, sondern auch im Steg eine Stumpfnah ausgeführt wird, eine stärkere wahre inverse Steigung vorliegt, als bei Trägern, in denen der Steg an der Stelle des Freischnitts durchgehend ist. Folglich lassen sich die Träger mit komplettem Stumpfstoß am Freischnitt als kerbschärfer charakterisieren #285.

6.2.6.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

In einigen Versuchsserien zum Konstruktionsdetail „Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten“ waren kaum Informationen zur Serie vorhanden, da es sich um Sekundärquellen handelte. Diese Serien wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 73 und bestätigt damit die derzeit gültige Kerbfallklasse 71 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-40.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 73 [N/mm²]

Bild 6-40: Kerbfalleinleitung „Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen ID: #285)

Figure 6-40: Fatigue classification of „Longitudinal butt weld, fillet weld or intermittent weld with a cope hole“ based on filtered test results

6.2.7 Längsbeanspruchte Stumpfnah – Detail 10

Longitudinal butt weld – Detail 10

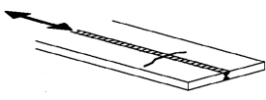
6.2.7.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der längsbeanspruchten Stumpfnah nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-25 dargestellt. Je nach Ausführung kommen drei verschiedene Kerbfallklassen a), b) oder c) in Frage.

Tabelle 6-29: Längsbeanspruchte Stumpfnah nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-29: Longitudinal butt weld according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung
a) 125 b) 112 c) 90		Längsbeanspruchte Stumpfnah: a) Beidseitig in Lastrichtung blecheben geschliffen, 100 % ZFP b) Ohne Schleifen und ohne Ansatzstellen c) Mit Ansatzstellen

6.2.7.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Längsbeanspruchte Stumpfnah“ sind wenige Quellen mit vielen Versuchsergebnissen bekannt, wie Tabelle 6-26 zeigt.

Tabelle 6-30: Übersicht Datengrundlage: „Längsbeanspruchte Stumpfnaht“

Table 6-30: Overview database: „Longitudinal butt weld“

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	183
Anzahl Quellen	1
Anzahl Serien	2

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „längsbeanspruchten Stumpfnaht“ ist in Bild 6-41 für Fall a (vgl. Tabelle 6-25) dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt. Für Fall b (vgl. Tabelle 6-25) sind alle Daten ohne weitere Unterteilung in Bild 6-42 zu erkennen. Die einzig vorhandene Quelle für dieses Detail ist eine sekundäre, aus dem Japanischen übersetzte, Quelle und enthält kaum Informationen zur Versuchsdurchführung, weswegen Versagensmechanismen und Einflussparameter unbekannt bleiben.

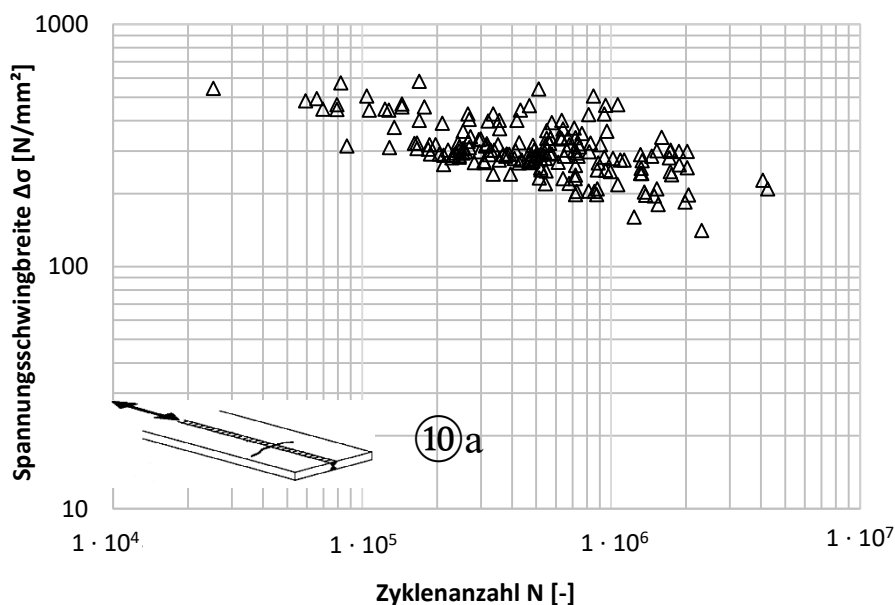


Bild 6-41: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Längsbeanspruchte Stumpfnaht“ a) #012

Figure 6-41: Illustration of experimental fatigue data for detail “Longitudinal butt welds” a)

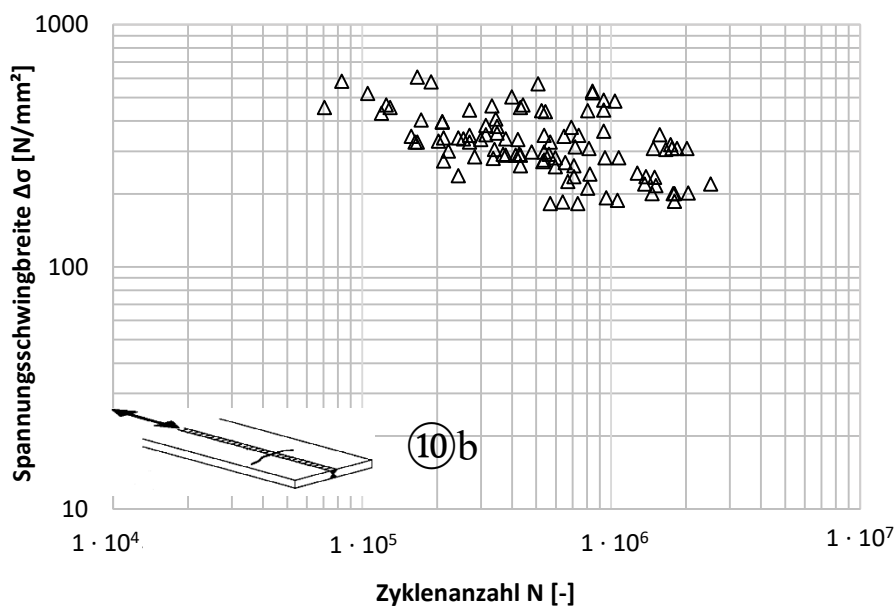


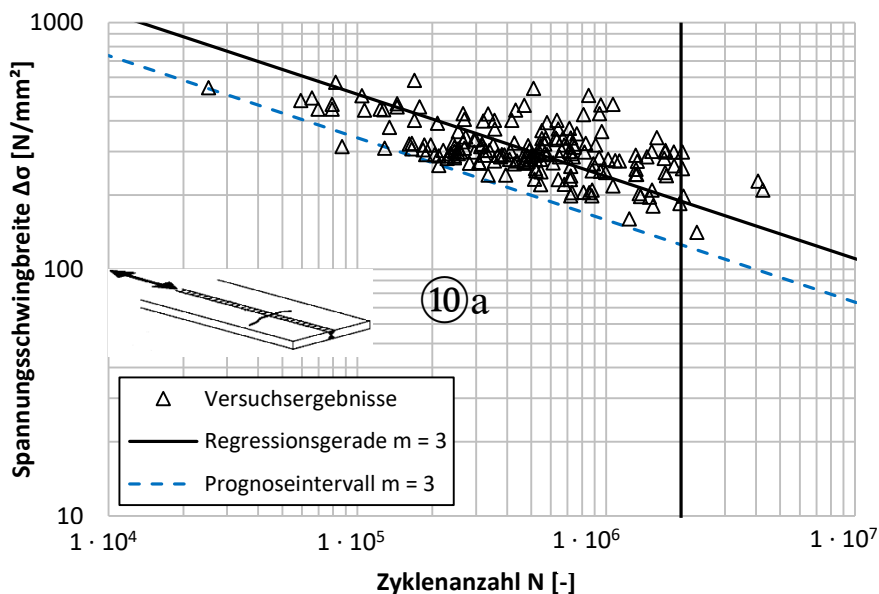
Bild 6-42: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Längsbeanspruchte Stumpfnaht“ b) #012

Figure 6-42: Illustration of experimental fatigue data for detail “Longitudinal butt welds” b)

6.2.7.3 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Obwohl nur eine übersetzte Sekundärquelle bekannt war, wurde zur generellen Überprüfung der Kerbfallklasse des Eurocodes anhand dieser Quelle eine Kerbfallableitung durchgeführt.

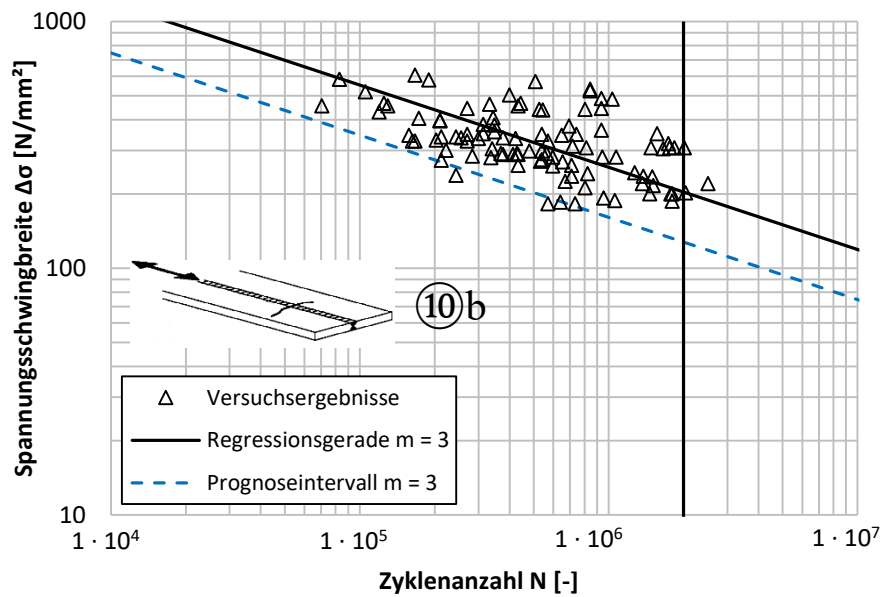


Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 126 [N/mm²]

Bild 6-43: Kerbfallableitung „Längsbeanspruchte Stumpfnaht“ a) (Quellen ID: #012)

Figure 6-43: Fatigue classification of “Longitudinal butt weld” a)

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse zur längsbeanspruchten Stumpfnaht mit der besten Ausführungsqualität a) (vgl. Tabelle 6-26) liefert Kerbfall 126 und bestätigt damit die derzeit gültigen Kerbfallklasse 125 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-43.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 128 [N/mm²]

Bild 6-44: Kerbfallableitung „längsbeanspruchte Stumpfnah“ b) (Quellen ID: #012)

Figure 6-44: Fatigue classification of “longitudinal butt weld” b)

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse des gleichen Details mit der etwas schlechteren Ausführung b (vgl. Tabelle 6-26) liefert unerwarteter Weise einen höheren Kerbfall von 128 und liegt damit theoretisch über der derzeit gültigen Kerbfallklasse 112 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-44. Die Aussagekraft der einen übersetzten Sekundärquelle sollte jedoch hinterfragt werden.

6.2.8 Automatisch geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen – Detail 11

Automatic longitudinal seam weld in hollow section – Detail 11

6.2.8.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-31 dargestellt. Auch bei diesem Detail kommen je nach Ausführung und Wanddicke drei verschiedene Kerbfallklassen a), b) oder c) in Frage.

Tabelle 6-31: Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-31: Automatic longitudinal seam weld in hollow sections according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung
a) 140 b) 125 c) 90		Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen: a) Ohne Ansatzstellen, Wanddicke $t \leq 12,5$ mm b) Ohne Ansatzstellen, Wanddicke $t > 12,5$ mm c) Mit Ansatzstellen

6.2.8.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen“ ist nur eine Serie bekannt, wie Tabelle 6-32 zeigt. Dabei handelt es sich erneut um eine japanische Sekundärquelle, die ins Deutsche übersetzt wurde.

Tabelle 6-32: Übersicht Datengrundlage: „Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen“

Table 6-32: Overview database: “Automatic longitudinal seam weld in hollow sections”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	7
Anzahl Quellen	1
Anzahl Serien	1

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen“ ist in Bild 6-45 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

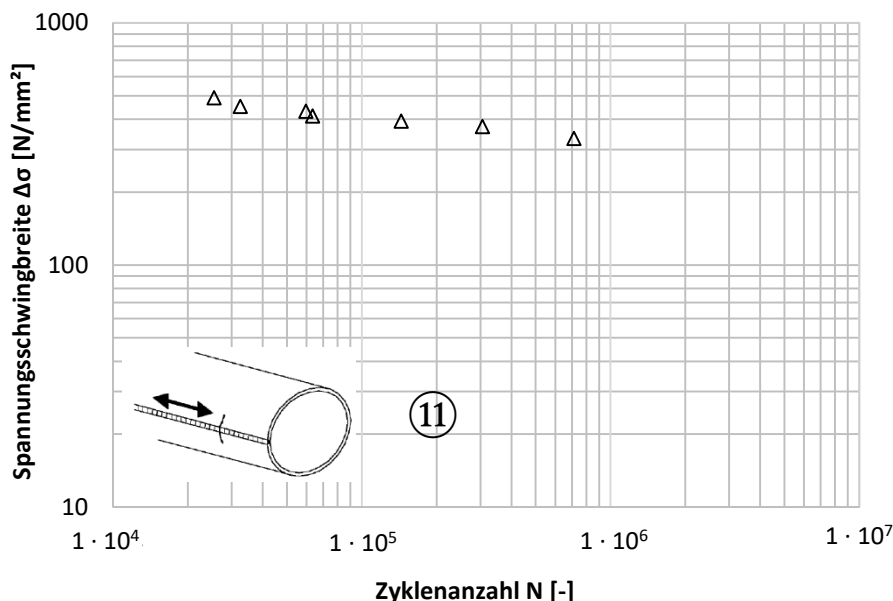


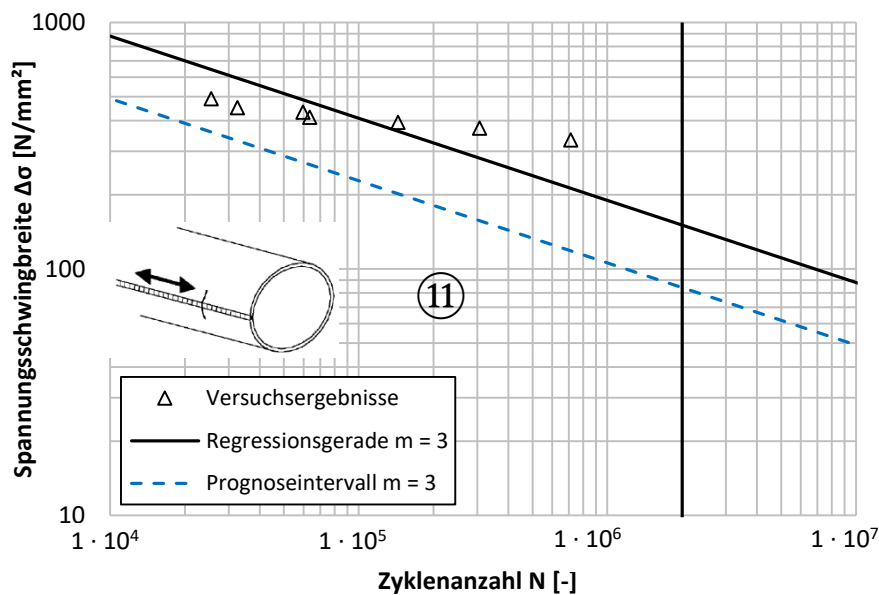
Bild 6-45: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen“ #041

Figure 6-45: Illustration of experimental fatigue data for detail “automatic longitudinal seam weld in hollow sections”

6.2.8.3 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Es konnte nur die einzig verfügbare Serie der übersetzten Sekundärquelle ausgewertet werden.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 84 [N/mm²]

Bild 6-46: Kerbfallableitung „Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnaht“ (Quellen ID: #041)

Figure 6-46: Fatigue classification of “Automatic longitudinal seam weld in hollow sections”

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 84 und liegt damit unterhalb derzeit gültigen Kerbfallklassen 140, 125 und 90 in DIN EN 1993-1-9 [1]. Anhand der Quelle #041 kann nicht geschlossen werden, ob Ansatzstellen an den Probekörpern vorhanden waren und welches Kerbdetail somit zutreffend wäre. Aufgrund der geringen Aussagekraft der übersetzten Quelle sollte die Kerbfallklasse nicht verändert werden.

6.3 Quer laufende Stumpfnähte – Tabelle 8.3

Transverse butt welds – Table 8.3

6.3.1 Übersicht

Overview

Tabelle 8.3 in DIN EN 1993-1-9 [1] gibt Ermüdungsfestigkeiten für Stumpfnähte an. Die Kerbdetails unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich ihrer Ausführung (z.B. einseitig oder zweiseitig geschweißt, mit oder ohne Schweißbadsicherung), sowie hinsichtlich der Ausgangsform der verbundenen Bauteile (gewalzte und geschweißte Träger oder Blecherzeugnisse). Außerdem unterteilt die Kerbfalltabelle die Ermüdungsfestigkeiten in Abhängigkeit der Schweißnahtüberhöhung. Die Schweißnahtüberhöhung dient dabei in erster Linie als Ersatzkriterium für den Nahtanstiegswinkel [65]. Eine Unterteilung der Versuchsergebnisse hinsichtlich der Schweißnahtüberhöhung ist jedoch nicht möglich, da die genaue Geometrie bei den im Schweißzustand belassenen Konstruktionsdetails in der Regel nicht dokumentiert ist. Die statistischen Auswertungen in diesem Kapitel fassen daher immer alle im Schweißzustand belassenen Konstruktionsdetails zusammen. Da jedoch einzelne Untersuchungen eine deutliche Abhängigkeit aufzeigen, vgl. Kapitel 9.2.4.2, wird die Berücksichtigung von der Schweißnahtüberhöhung auch für die überarbeiteten Kerbfalltabellen (siehe Kapitel 10.4) empfohlen.

Für alle Konstruktionsdetails in Tabelle 8.3 wird eine Blechdickenabhängigkeit angegeben. Eine signifikante Abhängigkeit lässt sich anhand der experimentellen Daten jedoch nicht feststellen, siehe auch Kapitel 9.2.4.1. Für eine Neubewertung fehlen jedoch experimentelle Daten aus dem Dickblechbereich. Ein Großteil der bekannten experimentellen Daten bezieht sich auf einen Blechdickenbereich kleiner als 20 mm. Alle statistischen Auswertungen in diesem Kapitel beziehen auf experimentelle Rohdaten, es erfolgt also keine Blechdickenkorrektur oder Ähnliches.

Die statistischen Auswertungen an Versuchsergebnissen für Stumpfstöße zeigen, dass die Ermüdungsfestigkeiten für kerbfrei bearbeitete Stumpfstöße sowie Stumpfstöße mit Schweißbadsicherung angehoben werden können.

6.3.2 Kerbfrei bearbeitete Stumpfstöße

Transverse splices ground flush

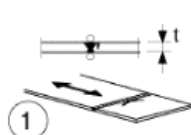
6.3.2.1 Übersicht

Overview

Das Konstruktionsdetail entspricht einem beidseitig geschweißten Stumpfstoß, der durch Schleifen nachträglich bearbeitet wurde. Dabei werden die Nahtüberhöhungen abgetragen, so dass ein blechebener Übergang zwischen Grundblech und Schweißnaht entsteht. Die geometrische Kerbe verschwindet dabei. Entsprechend den Anforderungen in [1] müssen für die Herstellung der Naht Schweißnahtanlauf bzw. Schweißnahtauslaufstücke verwendet werden, die anschließend entfernt werden. DIN EN 1993-1-9 [1] unterscheidet das Konstruktionsdetail zwar hinsichtlich der Bauteilform (Flacherzeugnisse, geschweißte Biegeträger, Walzprofile, Bleche mit Dicken oder Breitensprung), definiert aber den gleichen Kerbfall, sowie die gleichen Anforderungen, vgl. Tabelle 6-33. Die verfügbaren experimentellen Ergebnisse beziehen sich fast ausschließlich auf Kleinversuche an Blechstreifen.

Tabelle 6-33: Kerbfrei bearbeitete Stumpfstöße mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Table 6-33: Transverse splices (weld ground flush) with fatigue class classification according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
<p>112</p> <p>Blechdickenabhängigkeit für $t > 25$ mm:</p> $k_s = (25/t)^{0.2}$		<p>Ohne Schweißbadsicherung:</p> <p>1) Querstöße in Blechen und Flachstählen.</p>	<p>Alle Nähte blecheben in Lastrichtung geschliffen.</p> <p>Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen.</p> <p>Beidseitige Schweißung mit ZFP.</p>

6.3.2.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Experimentelle Ergebnisse sind fast ausschließlich an Flachstählen bekannt. Für dieses Detail gibt es jedoch eine große Versuchsgrundlage, siehe Tabelle 6-34.

Tabelle 6-34: Übersicht Datengrundlage: „Kerbfrei bearbeitete Stumpfstoße“

Table 6-34: Overview database: „Transverse splices (weld ground flush)“

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	607
Anzahl Quellen	18
Anzahl Serien	40

Die bekannten experimentellen Versuchsergebnisse zum Konstruktionsdetail sind in Bild 6-47 dargestellt.

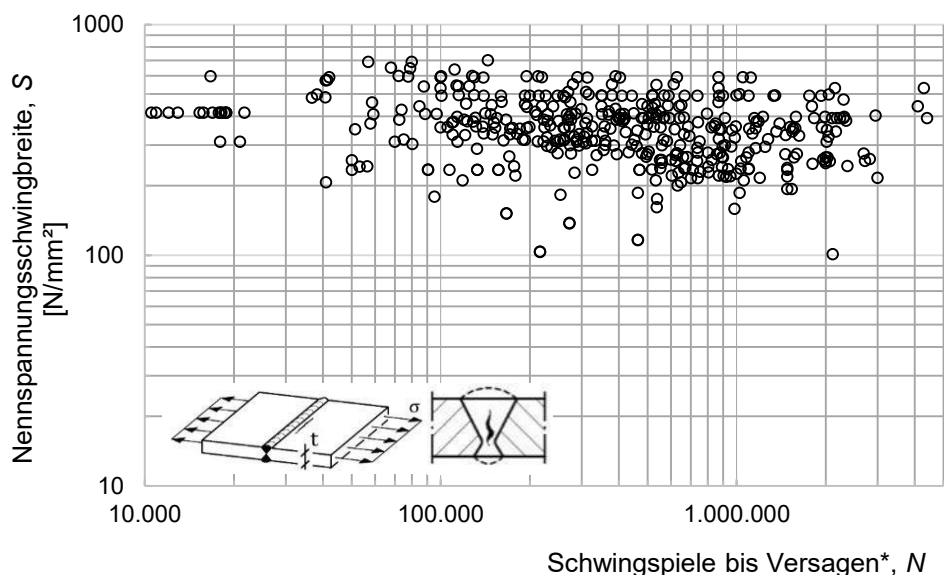


Bild 6-47: Gesammelte Daten des Details 80301: Quellen IDs: #21, #63, #179, #183, #215, #223, #224, #226, #232, #233, #235, #264, #265, #266, #267, #271, #277, #312

Figure 6-47: Collected test results “Detail 80301”

6.3.2.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass der kritische Ermüdungsrisss aufgrund der fehlenden geometrischen Kerbe nicht immer am Schweißnahtübergang initiiert wird.

So wird in einigen Quellen beschrieben, dass der Bruch wie in Bild 6-48 dargestellt, außerhalb des durch die Schweißnaht beeinflussten Bereichs stattfindet.

Soweit die Quellen Rückschlüsse auf den Versagensort zulassen, fanden die Ermüdungsbrüche zu etwa 80 % am Nahtübergang statt.

In [45] wurde anhand experimenteller Untersuchungen festgestellt, dass kerbfrei bearbeitete Stumpfnahte die gleiche Ermüdungsfestigkeit wie das Grundmaterial aufweisen können, wenn keine Schweißnahtunregelmäßigkeiten auftreten.

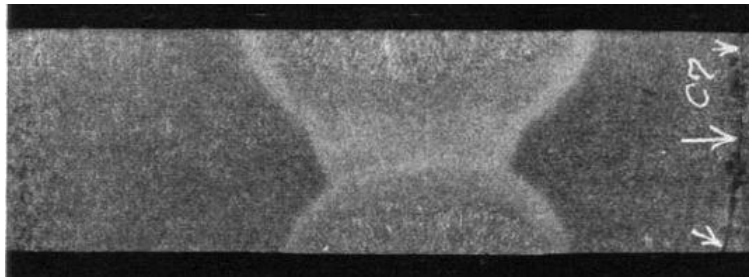


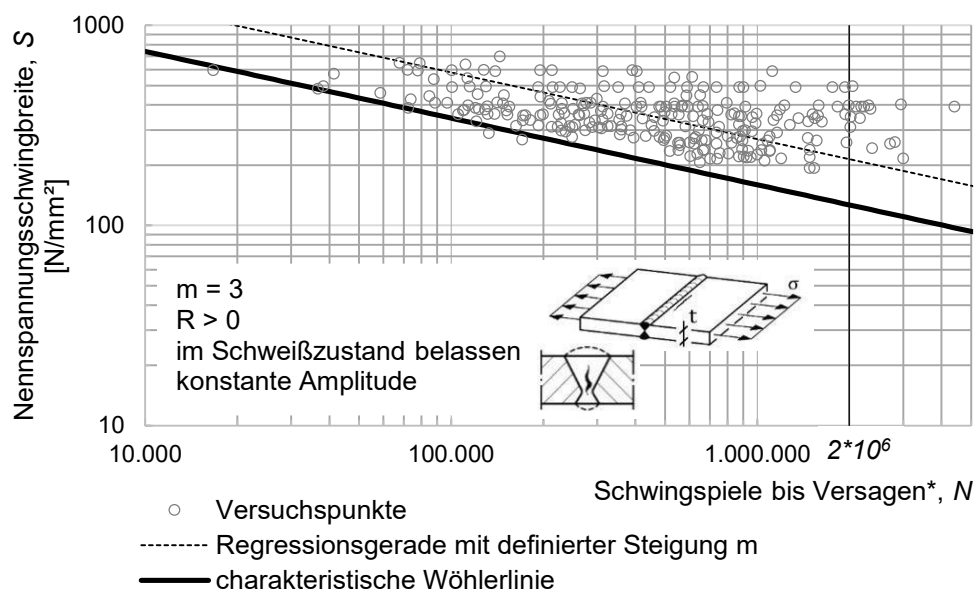
Bild 6-48: Bruchstelle am „Kerbfrei bearbeiteten Stumpfstoß“ [66]
 Figure 6-48: Fatigue crack “Transverse splice ground flush” [66]

6.3.2.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Auf Basis der statistischen Auswertung der gefilterten Daten in Bild 6-49 wird Kerbfall 127 berechnet. Das Kerbdetail ist damit deutlich besser als der in DIN EN 1993-1-9 [1] genormte Kerbfall 112.

Die experimentellen Daten zeigen auch auf, dass die Neigung der Wöhlerlinie mit $m = 3$ für dieses Detail etwas zu steil ist. Im folgenden Kapitel ist daher eine alternative Auswertung der fest definierten Steigung $m = 5$ dargestellt.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 127 [N/mm²]

Bild 6-49: Kerbfallableitung des Details „Kerbfrei bearbeiteter Stumpfstoß“ (Quellen IDs: #21, #63, #183, #215, #223, #224, #226, #235, #264, #277)

Figure 6-49: Fatigue classification of Detail “Transverse splice ground flush” (Source IDs: #21, #63, #183, #215, #223, #224, #226, #235, #264, #277)

6.3.2.5 Kerbfallableitung mit inverser Neigung der Wöhlerlinie $m = 5$

Fatigue detail category with inverse slope $m = 5$

Die Besonderheit dieses Details liegt in der Abwesenheit einer geometrischen Kerbe infolge der Bearbeitung der Schweißnaht. Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass

ein Zusammenhang zwischen der geometrischen Kerbschärfe und der Neigung der Wöhlerlinie besteht.

Bild 6-50 zeigt jeweils die mittlere und die charakteristische Wöhlerlinie bei einer fest definierten Neigung von $m = 5$.

Die statistische Auswertung mit $m = 5$ ergibt auf Grundlage der in Bild 6-50 dargestellten Versuchsergebnisse den Kerbfall 171. Der Kerbfall würde für Konstruktionsdetails mit über 200.000 Schwingspielen eine deutlich wirtschaftlichere Bemessung ermöglichen, widerspricht jedoch dem derzeitigen Ansatz, alle geschweißten Konstruktionsdetails mit einer Wöhlerlinienneigung von $m = 3$ zu bewerten.

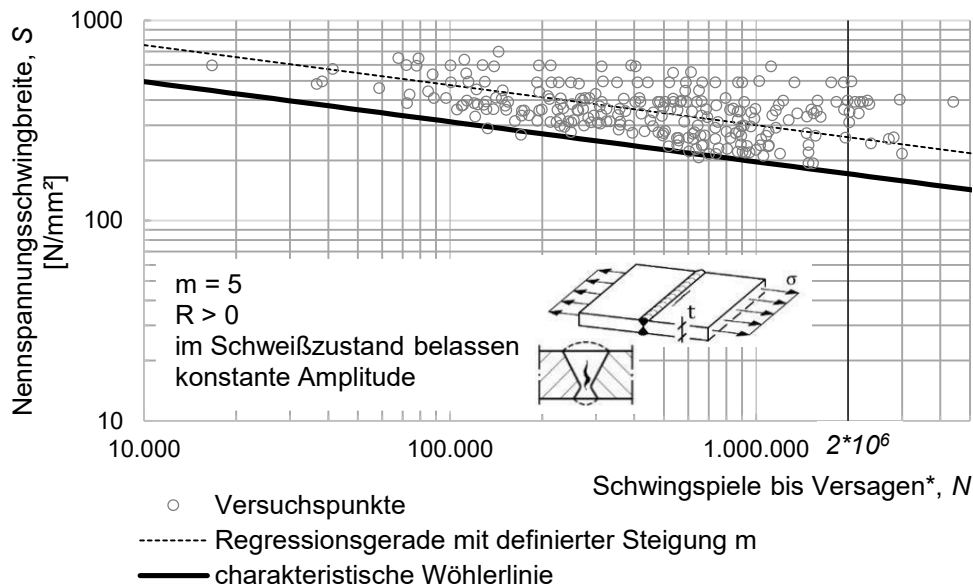


Bild 6-50: Neigungen der Wöhlerlinie für das Detail „Kerbfrei bearbeiteter Stumpfstoß“ (Quellen IDs: #21, #63, #183, #215, #223, #224, #226, #235, #264, #277)
Figure 6-50: Slope of S-N curve “Transverse splices ground flush”

6.3.2.6 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

Die charakteristische Wöhlerlinie der DAST/FOSTA Datensammlung wird in Bild 6-51 zusammen mit den Bemessungslinien der DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIW-Empfehlungen [16] dargestellt.

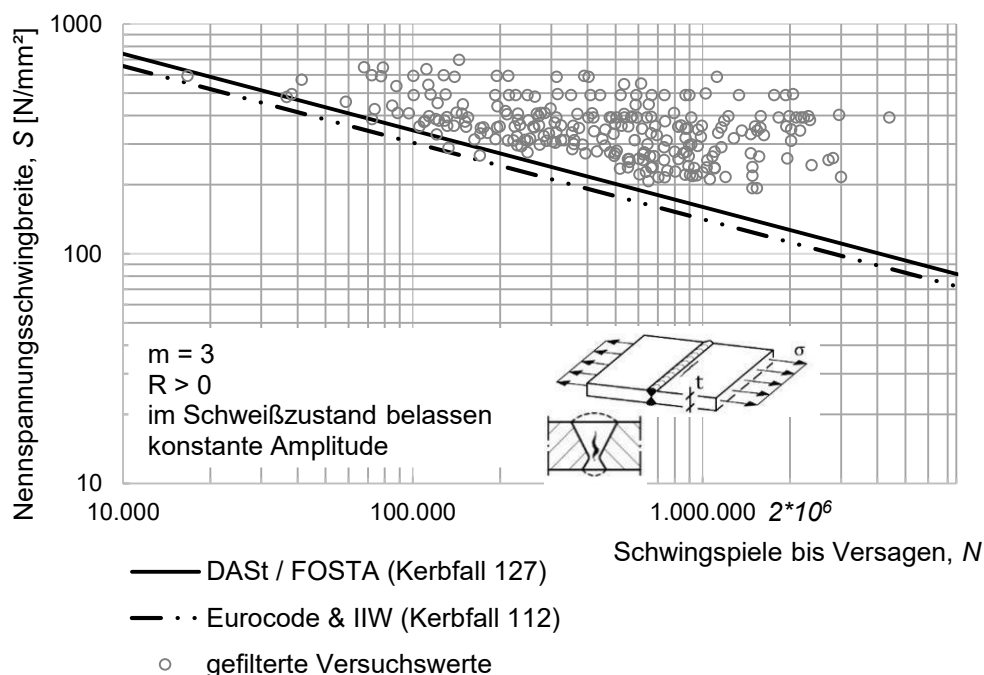


Bild 6-51: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „Kerbfrei bearbeiteter Stumpfstoß“ mit der DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIW-Empfehlungen [16]

Figure 6-51: Comparison of characteristic S-N curves for “Transverse splices ground flush” with DIN EN 1993-1-9 [1] and IIW recommendations [16]

Die Werte der DIN EN 1993-1-9 [1] und des IIWs [16] stimmen bei diesem Detail hinsichtlich der charakteristischen Wöhlerlinie überein. Mit Kerbfall 127 weisen die experimentellen Daten eine deutlich bessere Ermüdungsfestigkeit auf. Für die Kerbfallempfehlungen in Kapitel 10.4 wird daher eine höhere Ermüdungsfestigkeit vorgeschlagen.

6.3.3 Stumpfstoße in Blechen und Flachstählen

Transverse splices in plates and flats.

6.3.3.1 Übersicht

Overview

Dieses Konstruktionsdetail umfasst alle Stumpfstoße, die beidseitig mit mindestens einer Gegenlage geschweißt sind und bei denen die Schweißnahtüberhöhung im Schweißzustand belassen wurde. In den experimentellen Untersuchungen ist die Form der Schweißnahtüberhöhung in den wenigsten Fällen dokumentiert. Aus diesem Grund überschneiden sich die experimentellen Ergebnisse in den dazugehörigen Kerbfällen mit unterschiedlich definierten Schweißnahtüberhöhungen.

Zu den beidseitig geschweißten Nähten zählen auch solche, die hauptsächlich von einer Seite geschweißt werden, jedoch zusätzlich eine Gegenlage erhalten. Entsprechend den Anforderungen in [1] müssen für die Herstellung der Naht Schweißnahtanlauf bzw. Schweißnahtauslaufstücke verwendet werden, die anschließend entfernt werden, vgl. auch Tabelle 6-35.

Tabelle 6-35: Stumpfstöße in Blechen und Flachstählen mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Table 6-35: Transverse splices in plates and flats with fatigue class classification according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
90 Detail 80305 bzw. 80 Detail 80311 Blechdickenabhängigkeit für $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0,2}$		5) Querstöße von Blechen oder Flachstählen. 11) Querstöße in Blechen, Flachstählen, Walzprofilen oder geschweißten Blechträgern.	<ul style="list-style-type: none"> – Die Nahtüberhöhung muss ≤ 10 % der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden. (Detail 80305) – Die Nahtüberhöhung muss ≤ 20 % der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden. (Detail 80311) – Schweißnaht- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP

6.3.3.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Eine Übersicht zu den verfügbaren experimentellen Daten findet sich in Tabelle 6-36. Die Ergebnisse aller bekannten Versuche sind in Bild 6-52 dargestellt. Nur für einen sehr kleinen Teil der Versuche sind Angaben zur Nahtüberhöhung bzw. dem Nahtanstiegswinkel dokumentiert.

Tabelle 6-36: Übersicht Datengrundlage: Stumpfstöße in Blechen und Flachstählen“

Table 6-36: Overview database: Transverse splices in plates and flats

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	2843
Anzahl Quellen	53
Anzahl Serien	199

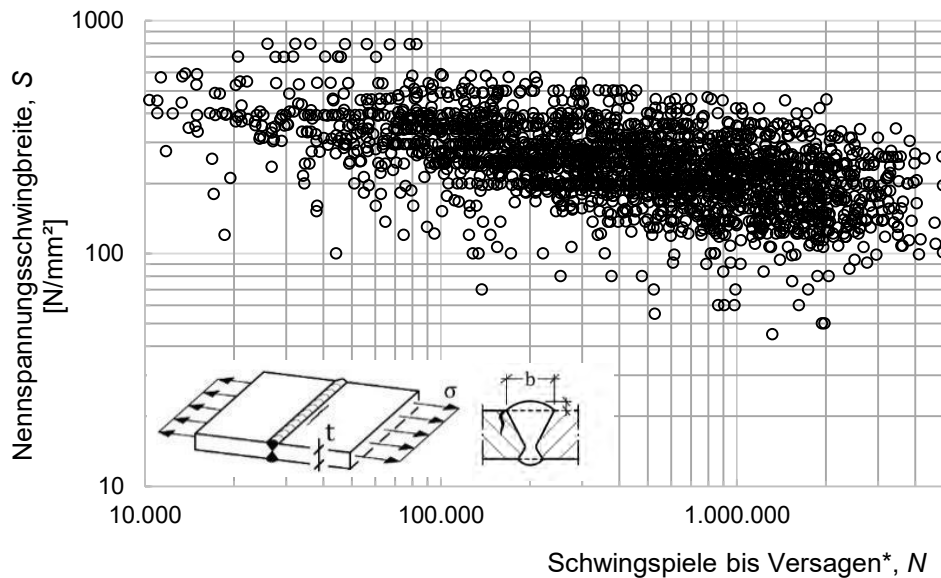


Bild 6-52: Gesamte Daten des Details „Stumpfstöße in Blechen und Flachstählen“-
 (Quellen IDs: #18, #21, #61, #63, #99, #116, #128, #149, #177, #178, #180, #181, #183, #186, #195, #216, #217, #218, #219, #220, #221, #222, #223, #224, #225, #226, #227, #228, #229, #230, #231, #232, #235, #236, #237, #239, #241, #244, #249, #263, #264, #265, #266, #269, #272, #273, #277, #303, #306, #308, #311, #312)

Figure 6-52: Collected test results “Transverse splices in plates and flats”

6.3.3.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Bei diesem Detail ist der Übergang zur Schweißnaht und dessen Ausprägung der maßgebende Einflussfaktor, vgl. Bild 6-53. In [45] wird beispielsweise anhand experimenteller Untersuchungen gezeigt, dass der „Schärfegrad“ (org.: severity) der Schweißnahtüberhöhung die Ermüdungsfestigkeit maßgeblich beeinflusst. Insbesondere der Schweißnahtanstiegswinkel beeinflusst die Ermüdungsfestigkeit.

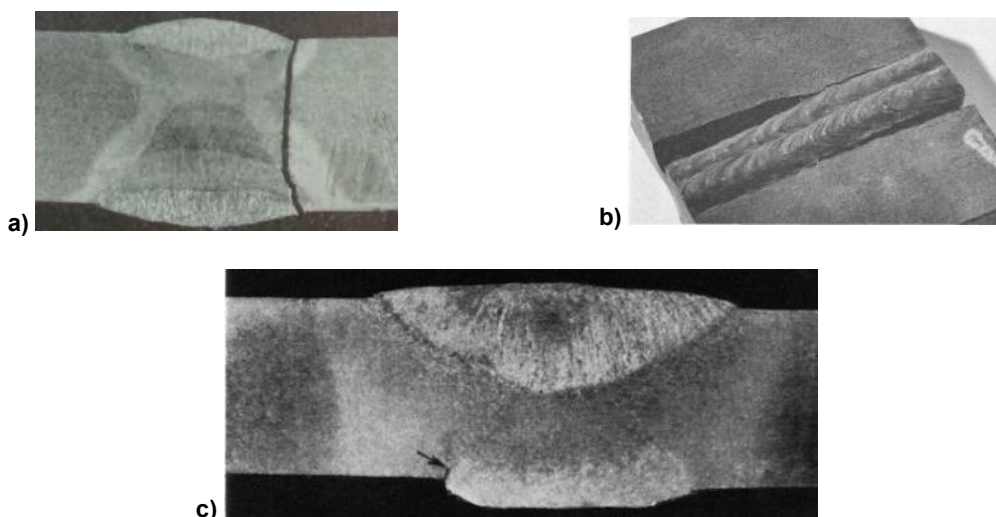


Bild 6-53: Bruchstellen am Detail Stumpfstöße in Blechen und Flachstählen (a: [46], b: [45], c: [67])

Figure 6-53: Fatigue cracks, Transverse splices in plates and flats (a: [46], b: [45], c: [67])

6.3.3.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Die statistische Auswertung der experimentellen Daten ergibt ohne Unterteilung hinsichtlich der Schweißnahtüberhöhung Kerbfall 89 für das Konstruktionsdetail Stumpfstoß (vgl. Bild 6-54). DIN EN 1993-1-9 [1] gibt den Kerbfall 90, für das Detail 80305 mit kleiner Nahtüberhöhung, bzw. Kerbfall 80, für Detail 80311 mit größerer Nahtüberhöhung, an.

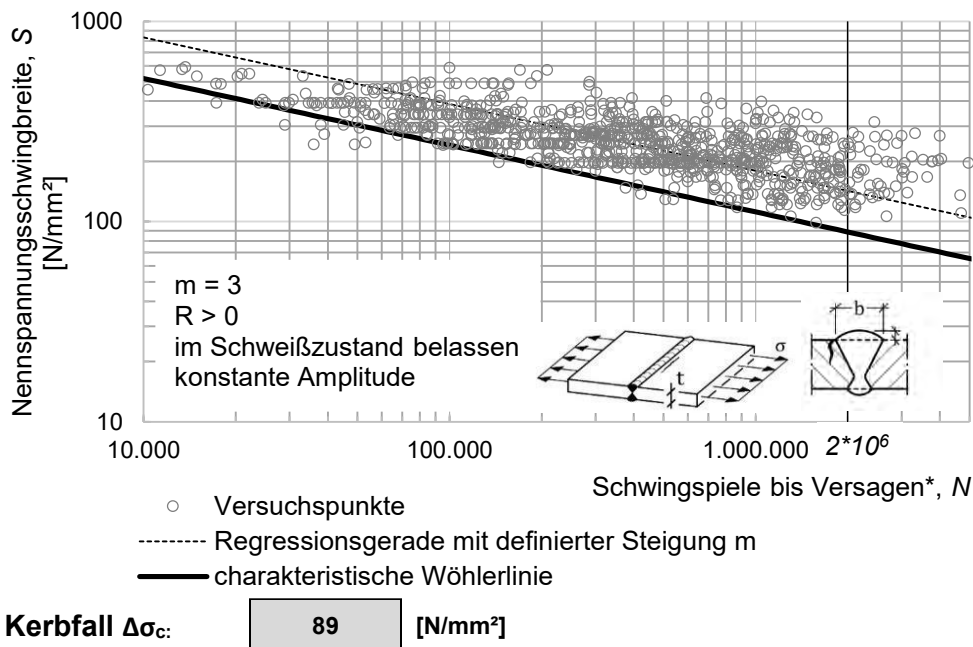


Bild 6-54: Kerbfallableitung des Details „Stumpfstoße in Blechen und Flachstählen“ (Quellen IDs#21, #61, #116, #128, #149, #178, #181, #183, #186, #223, #225, #226, #235, #236, #237, #264, #265, #272, #273, #277, #306, #308, #311, #312)

Figure 6-54: Fatigue classification of detail “Transverse splices in plates and flats”

6.3.3.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

Sowohl Olivier und Ritter [68] als auch Gurney [69] haben zum Konstruktionsdetail Stumpfstoß eine größere Menge an Versuchsergebnissen ausgewertet. Die jeweiligen mittleren Wöhlerlinien werden in Bild 6-55 zusammen mit der DAST/FOSTA Datensammlung dargestellt. Die DAST/FOSTA Datensammlung beinhaltet in gefilterter Form neben weiteren Versuchsergebnissen sowohl die Versuchsergebnisse von Olivier und Ritter als auch von Gurney. Für den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit liefern alle Datensammlungen sehr ähnliche Ermüdungsfestigkeiten. Die aus den Versuchen ermittelte Neigung ist zudem sehr ähnlich zu der von Gurney ermittelten Wöhlerlinienneigung.

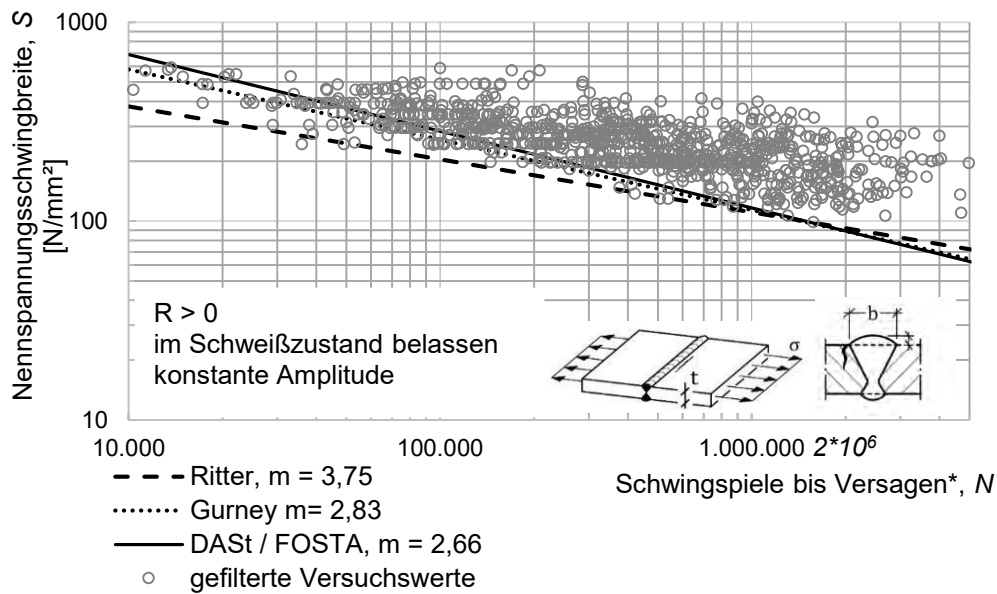


Bild 6-55: Vergleich charakteristischer Wöhlerlinien des Details Stumpfstoße in Blechen und Flachstählen [69] und [68]

Figure 6-55: Comparison of characteristic S-N curves of Detail "Transverse splices in plates and flats"

Bild 6-56 zeigt die charakteristische Wöhlerlinie der DAST/FOSTA Datensammlung, die nahezu identisch zu der der DIN EN 1993-1-9 [1] und der IIW-Empfehlungen verläuft. Die DIN EN 1993-1-9 [1] und die IIW-Empfehlungen [16] geben beide Kerbfall 90 für das Detail an. Verglichen wird mit dem Detail mit kleiner Nahtüberhöhung. Die Versuchsdaten der DAST/FOSTA Datenbank enthalten jedoch auch Versuche mit größerer Nahtüberhöhung und tendenziell niedrigeren Ermüdungsfestigkeiten.

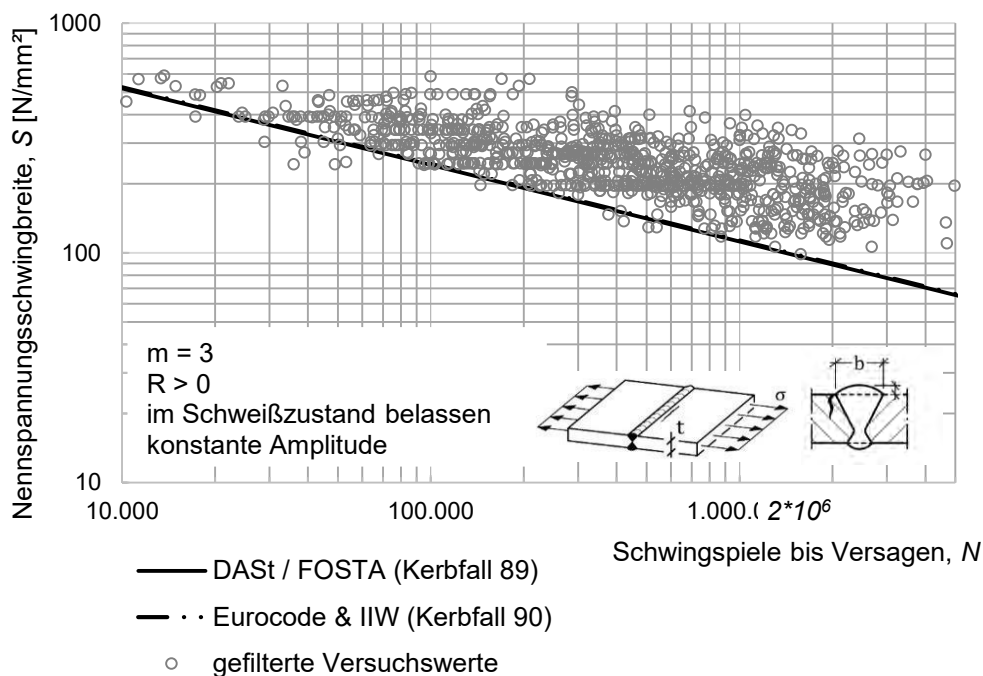


Bild 6-56: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „Stumpfstoße in Blechen und Flachstähen“ mit der DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIW-Empfehlungen [16]

Figure 6-56: Comparison of characteristic S-N curves for detail "Transverse splices in plates and flats" with DIN EN 1993-1-9 [1] and IIW recommendations [16]

6.3.4 Stumpfstöße mit Geometrieänderung

Transverse splices tapered

6.3.4.1 Übersicht

Overview

Das Detail beschreibt Bleche, die ab der Stumpfnaht eine Veränderung der Blechdicke oder der Blechbreite aufweisen.

Das korrespondierende Detail in DIN EN 1993-1-9 [1] ist das Detail 80307: „Querstöße von Blechen oder Flachstählen, abgeschrägt in Breite oder Dicke mit einer Neigung kleiner als 1:4“. Weiterhin ist die Schweißnaht nach Eurocode in Wannennlage durchzuführen, siehe Tabelle 6-37.

Tabelle 6-37: Stumpfstöße mit Geometrieänderung nach [1]

Table 6-37: Transverse splices tapered [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
<p>90 (Detail 80307)</p> <p>$t > 25 \text{ mm}$: $k_s = (25/t)^{0,2}$</p>		<p>7) Querstöße von Blechen oder Flachstählen, abgeschrägt in Breite oder Dicke mit einer Neigung $\leq 1/4$. Der Übergang muss kerbfrei ausgeführt werden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Die Nahtüberhöhung muss $\leq 10 \%$ der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden. – Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP – Die Nähte sind in Wannennlage zu schweißen

6.3.4.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

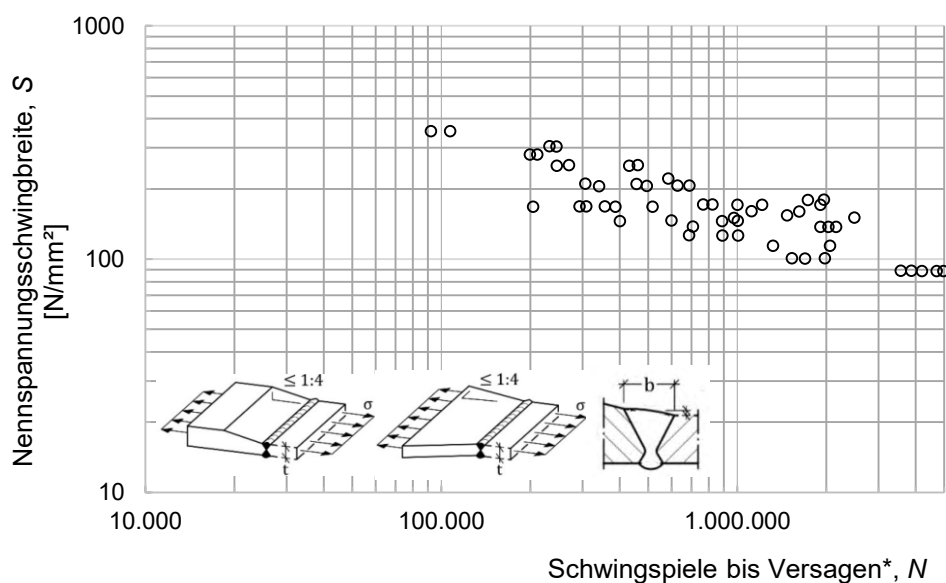
Available experimental test data

Der Umfang der bekannten Daten ist in Tabelle 6-38 dargestellt. Die bekannten experimentellen Ergebnisse basieren nur auf einer Quelle. Die entsprechenden Daten sind in Bild 6-57 zusammengefasst.

Tabelle 6-38: Übersicht Datengrundlage: „Stumpfstoß mit Geometrieänderung“

Table 6-38: Overview database: „Transverse splices tapered“

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	58
Anzahl Quellen	1
Anzahl Serien	3



**Bild 6-57: Gesamte Daten des Details „Stumpfstoß mit Geometrieänderung“-
(Quellen IDs: #269)**

Figure 6-57: Collected test results “Transverse splices tapered”

Ein Teil der vorliegenden Versuchsergebnisse zu diesem Detail weist ein Übergangsverhältnis von 1:5 auf. Alle Probekörper sind, anders als in den Anforderungen in Tabelle 6-37 beschrieben, im Schweißzustand belassen.

6.3.4.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Die Rissentwicklung der vorhandenen Versuche zeigt, dass die Risse jeweils am Schweißnahtübergang entstanden sind. Dabei entstanden die Risse sowohl an der Seite deren Maße gleichbleibend sind, als auch dort, wo das Blech abgeschrägt ist [70].

6.3.4.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

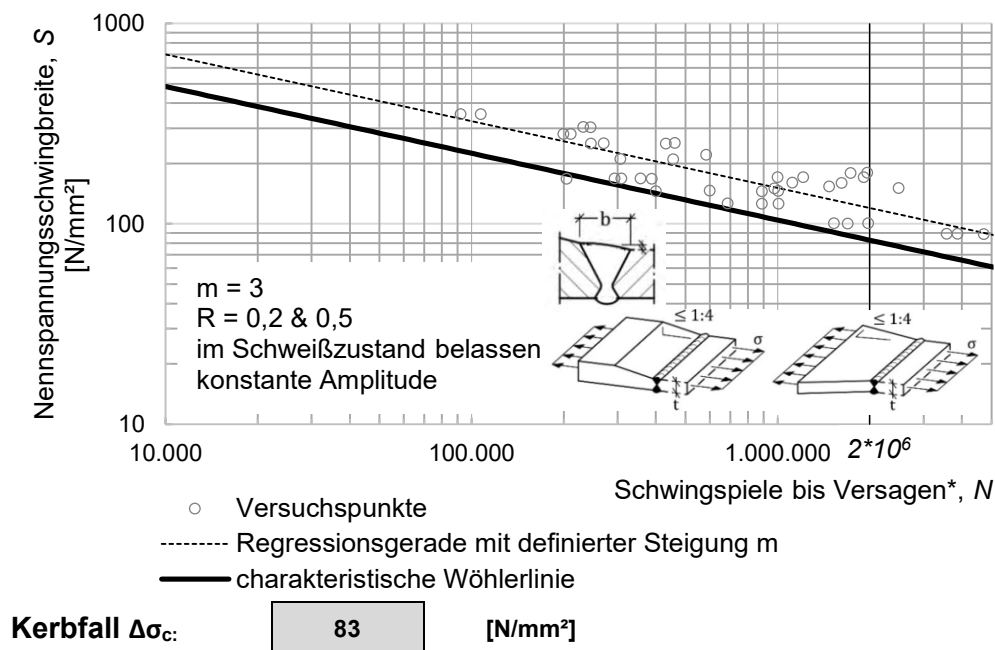


Bild 6-58: Kerbfallableitung des Details Stumpfstoß mit Geometrieänderung (Quellen ID #269)

Figure 6-58: Fatigue classification of Detail “Transverse splices tapered”

Bei den Stumpfstoßen mit Geometrieänderung ergibt die statistische Auswertung der experimentellen Daten den Kerbfall 83. Anders als in DIN EN 1993-1-9 [1] gefordert, sind diese jedoch nicht kerbfrei bearbeitet, sondern im Schweißzustand belassen.

Alle für die statistische Auswertung herangezogenen Daten beziehen sich auf unkorrigierte Nennspannungen im kleineren Querschnittsteil. Eine mögliche Spannungserhöhung aus Exzentrizitäten ist damit bereits in den Versuchsdaten enthalten.

6.3.4.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

In Bild 6-59 ist die charakteristische Wöhlerlinie im Vergleich zu den Kerbfällen in DIN EN 1993-1-9 [1] dargestellt. Die statistische Auswertung der experimentellen Daten liefert einen etwas tieferen Kerbfall. Die Versuchswerte sind jedoch alle im Schweißzustand belassen.

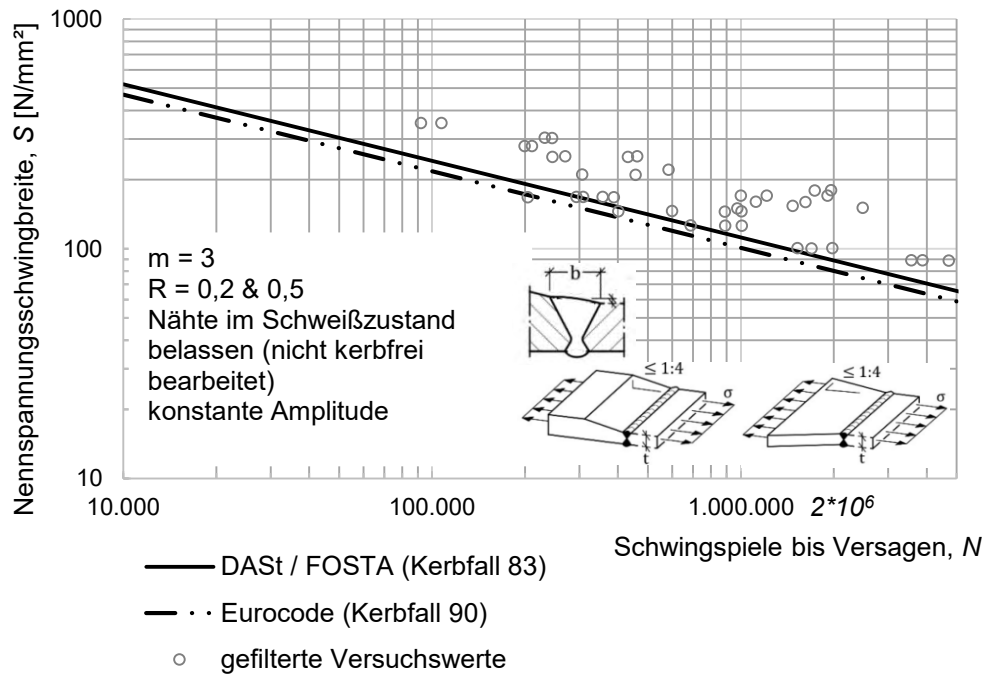


Bild 6-59: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „Stumpfstoß mit Geometrieänderung“ mit DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-59: Comparison of characteristic S-N curves for “Transverse splices tapered” with DIN EN 1993-1-9 [1]

6.3.5 Vollstöße von Walzprofilen

Full cross section butt welds

6.3.5.1 Übersicht

Overview

Das Detail entspricht einem Vollstoß in Trägerprofilen, die ohne Freischnitte zusammengeschweißt werden. Das korrespondierende Detail in DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-39 dargestellt.

Tabelle 6-39: Vollstoß Walzprofil [1]

Table 6-39: Full cross section butt weld [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
<p>90 (Detail 80308)</p> <p>$t > 25 \text{ mm}$: $k_s = (25/t)^{0,2}$</p>		<p>6) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten ohne Freischnitt</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Die Nahtüberhöhung muss $\leq 10 \%$ der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden. – Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen.

Die Anzahl der bekannten experimentellen Versuche ist gering. Es steht für die Auswertung nur eine Quelle [71] zur Verfügung, vgl. Tabelle 6-40. Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind in Bild 6-60 dargestellt.

Tabelle 6-40: Übersicht Datengrundlage: „80309“ – Vollstöße in Walzprofilen“

Table 6-40: Overview database: „80309“ – Full cross section butt welds

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	12
Anzahl Quellen	1
Anzahl Serien	3

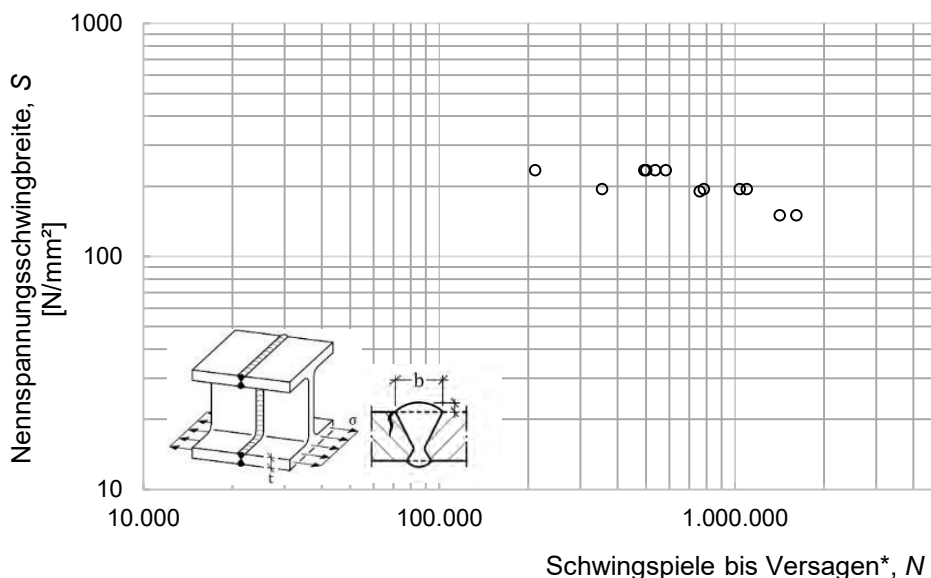


Bild 6-60: Gesamte Daten des Details „Vollstöße von Walzprofilen“ (Quellen IDs: #240)

Figure 6-60: Collected test results “Full cross section butt welds”

6.3.5.2 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Die experimentellen Untersuchungen in [71] zeigen, dass der Übergang zwischen dem Flansch und dem Steg die schwächste Stelle ist und die Träger hier als erstes einen Ermüdungsriss ausbilden. Das gilt auch dann, wenn kleine Schweißnahtunregelmäßigkeiten im Bereich der Ausrundungsradien auftreten.

6.3.5.3 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Statistisch ergibt sich aus den in Bild 6-61 dargestellten gefilterten Daten der Kerbfall 97, der vergleichbar ist mit dem etwas schwächeren Kerbfall 90 in DIN EN 1993-1-9 [1]. Auch die Neigung der charakteristischen Wöhlerlinie gibt den Verlauf der experimentellen Daten mit $m = 3$ gut wieder, auch wenn die Stichprobengröße vergleichsweise klein ist.

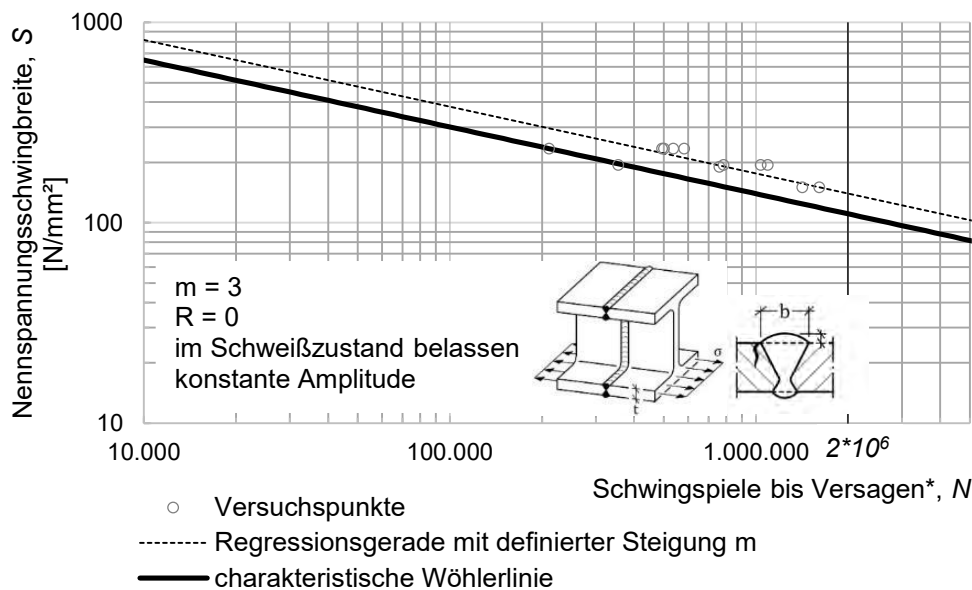


Bild 6-61: Kerbfalleinstufung des Details Vollstöße von Walzprofilen (Quellen ID: #240)

Figure 6-61: Fatigue classification of Detail “Full cross section butt welds”

In Bild 6-62 wurde die charakteristische Wöhlerlinie der DAST/FOSTA Datensammlung mit der aktuellen Kerbfalleinstufung in DIN EN 1993-1-9 [1] für das korrespondierende Detail mit Kerbfall 90 verglichen. Die Versuchsergebnisse belegen eine hohe Ermüdungsfestigkeit, die zudem auch im Streufeld für die Ermüdungsfestigkeit von Flachstählen liegt, vgl. auch 6.3.3.4.

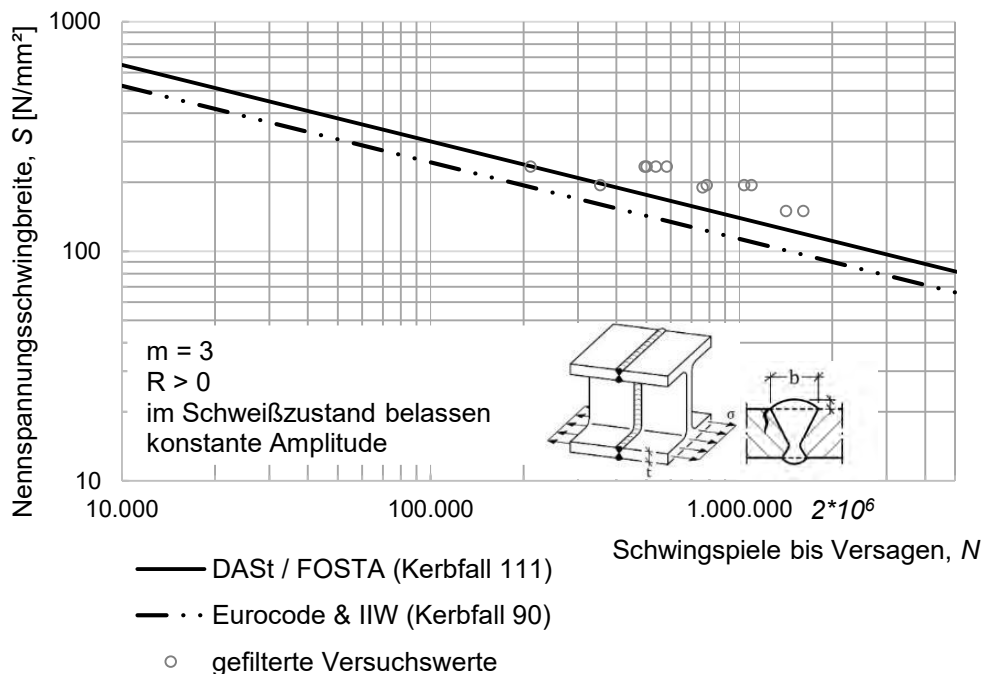


Bild 6-62: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „Vollstöße von Walzprofilen“ mit der DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-62: Comparison of characteristic S-N curves for “Full cross section butt welds” with DIN EN 1993-1-9 [1]

6.3.6 Vollstöße von Walzprofilen mit Freischnitt

Full cross section butt welds of rolled sections with cope hole

6.3.6.1 Übersicht

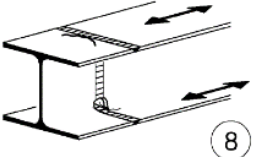
Overview

Das Detail behandelt Vollstöße von gewalzten Profilen mit Freischnitten. Der Freischnitt ermöglicht einen ungestörten Zugang zum Schweißen der Flansche, jedoch entstehen an den Enden der Freischnitte hohe Spannungskonzentrationen, die Ermüdungsrisswachstum begünstigen. In [71] wird anhand experimenteller Untersuchungen gezeigt, dass die Variante ohne Freischnitt bessere Ermüdungseigenschaften aufweist.

Der Kerbfallkatalog der DIN EN 1993-1-9 listet mehrere Einträge für Stumpfstöße an Trägern mit Freischnitten auf. Das korrespondierende Detail für geschweißte Querschnitte wird in Tabelle 8.2 behandelt. In Tabelle 8.3 wird, ähnlich wie bei den Flachstählen, hinsichtlich der Schweißnahtüberhöhung unterschieden. In Tabelle 6-41 ist das Kerbdetail 80308: „Vollstoß von Walzprofilen mit Stumpfnähten mit Freischnitten“ beispielhaft dargestellt.

Tabelle 6-41: Vollstoß von Walzprofilen mit Freischnitt nach [1]

Table 6-41: Full cross section butt welds of rolled sections with cope hole [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
<p>90 (Detail 80308)</p> <p>$t > 25 \text{ mm}$: $k_s = (25/t)^{0,2}$</p>		<p>8) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten mit Freischnitten</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Alle Nähte blecheben in Lastrichtung geschliffen – Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Last- richtung zu schleifen. – Beidseitige Schweißung mit ZFP – Walzprofile mit denselben Abmessungen ohne Toleranzunterschiede

6.3.6.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Die bekannten experimentellen Daten beschränken sich auf eine Quelle mit insgesamt neun Wöhlerversuchen, vgl. Tabelle 6-40.

Tabelle 6-42: Übersicht Datengrundlage: Stumpfstöße in geschweißten Profilen mit Freischnitt

Table 6-42: Overview database: Transverse splices in welded plate girders with cope holes

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	9
Anzahl Quellen	1
Anzahl Serien	2

6.3.6.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Der Freischnitt stellt in diesem Detail einen Schwachpunkt bezüglich der Ermüdungsfestigkeit dar. Er ist somit auch die häufigste Ursache für einen Rissbeginn. Die Versuche zeigen, dass der Vorteil einer fehlerfrei durchgeschweißten Flanschnaht die durch Freischnitte verursachte Schwächung nicht ausgleichen kann.

6.3.6.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

In Bild 6-63 ist die statistische Auswertung anhand der sehr kleinen Datenbasis dargestellt. Aus den experimentellen Daten ergibt sich Kerbfall 90.

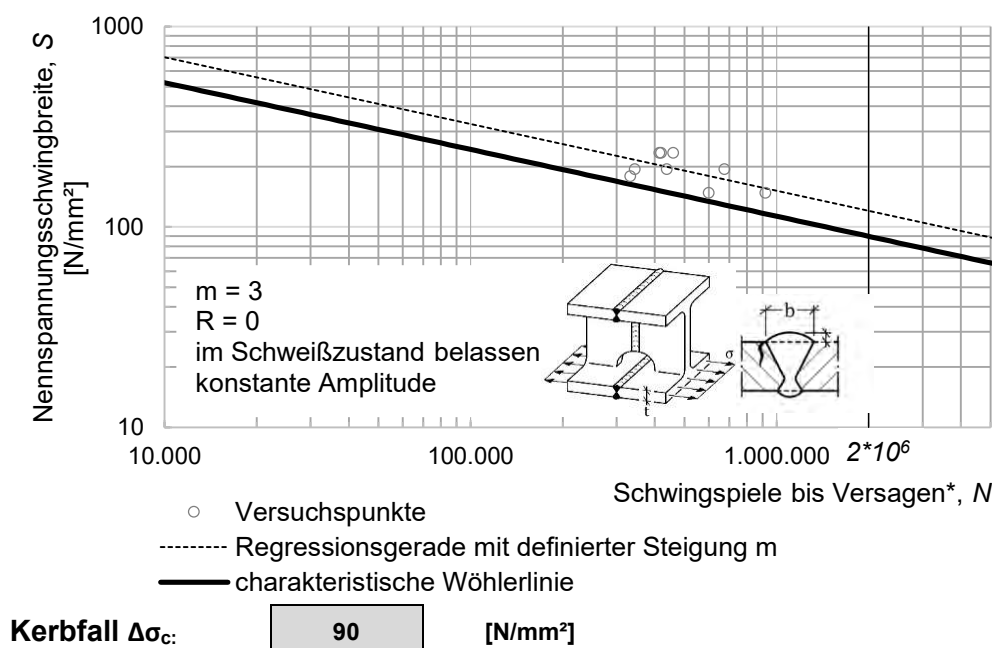


Bild 6-63: Kerbfallableitung des Details „Vollstöße von Walzprofilen mit Freischnitten“ (Quellen ID: #240)

Figure 6-63: Fatigue classification of detail “Full cross section butt welds with cope holes”

6.3.6.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

Die Ermittlung der charakteristischen Wöhlerlinie anhand der vorliegenden Daten ergibt eine große Ähnlichkeit zu der charakteristischen Wöhlerlinie, wie sie in DIN EN 1993-1-9 [1] gegeben ist, vgl. Bild 6-64.

Im Vergleich zu der Variante ohne Freischnitt (vgl. Kapitel 6.3.5) ist die Ermüdungsfestigkeit jedoch deutlich reduziert. Die Ergebnisse lassen sich direkt vergleichen, da alle Daten aus einer einzigen Untersuchung stammen [71]. Für die Kerbfallempfehlung in Kapitel 10.4.3 sind die Vollstöße mit Freischnitt aus diesem Grund auch tiefer eingestuft als die Variante ohne Freischnitt.

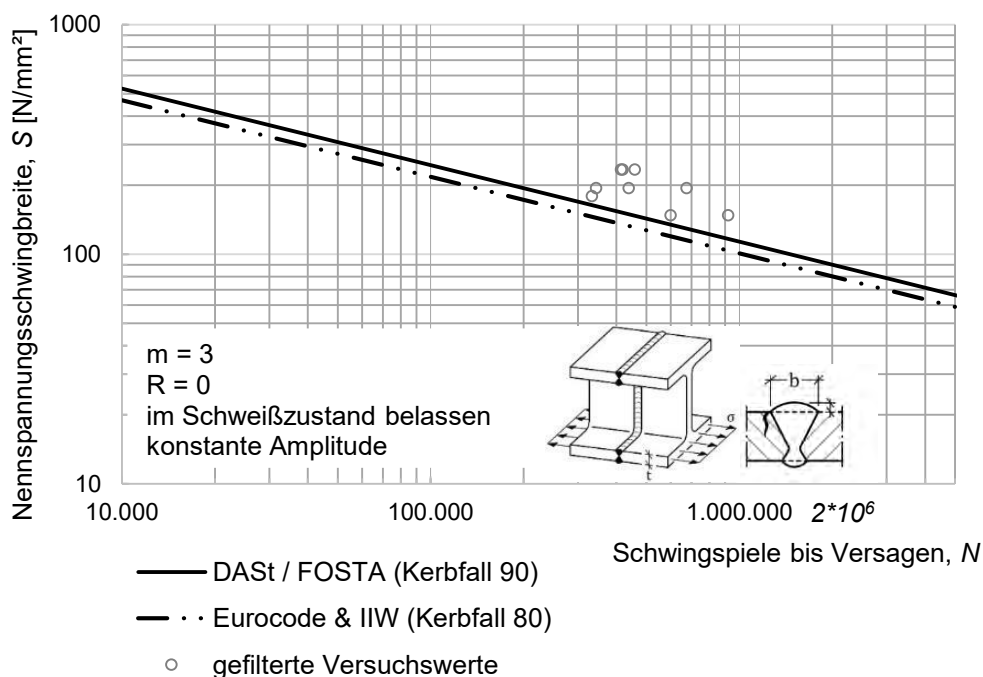


Bild 6-64: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „Vollstöße von Walzprofilen mit Freischnitten“ mit DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-64: Comparison of characteristic S-N curves for “Full cross section butt welds with cope holes” with DIN EN 1993-1-9 [1]

6.3.7 Einseitig geschweißte Stumpfnähte

Butt welds made from one side only

6.3.7.1 Übersicht

Overview

Die Besonderheit des Konstruktionsdetails besteht darin, dass das Detail von nur einer Seite und ohne Schweißbadsicherung geschweißt wird. Relevant ist das Detail für schwer zugängliche Konstruktionen unter zyklischer Belastung. Mit über 600 bekannten Versuchsergebnissen aus 13 Primärquellen ist das Detail gut belegt, vgl. Tabelle 6-43.

Tabelle 6-43: Übersicht Datengrundlage: Stumpfstöße in geschweißten Profilen mit Freischnitt

Table 6-43: Overview database: Transverse splices in welded plate girders with cope holes

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	615
Anzahl Quellen	13
Anzahl Serien	42

Maßgebend für die Ermüdungsfestigkeit ist die Schweißnahtwurzel. Wenn die Wurzel beispielsweise durch spezielle Schweißverfahren kerbarm ausgeführt werden kann, sind Ermüdungsfestigkeiten wie für Stumpfstöße mit Gegenlage erreichbar. Da die Kerbschärfe der Wurzel zugleich signifikanter und streuender Parameter ist, ist eine statistische Auswertung des Konstruktionsdetails nicht sinnvoll. Bild 6-65 zeigt das breite Streufeld aller bekannten experimentellen Ergebnisse zum Konstruktionsdetail.

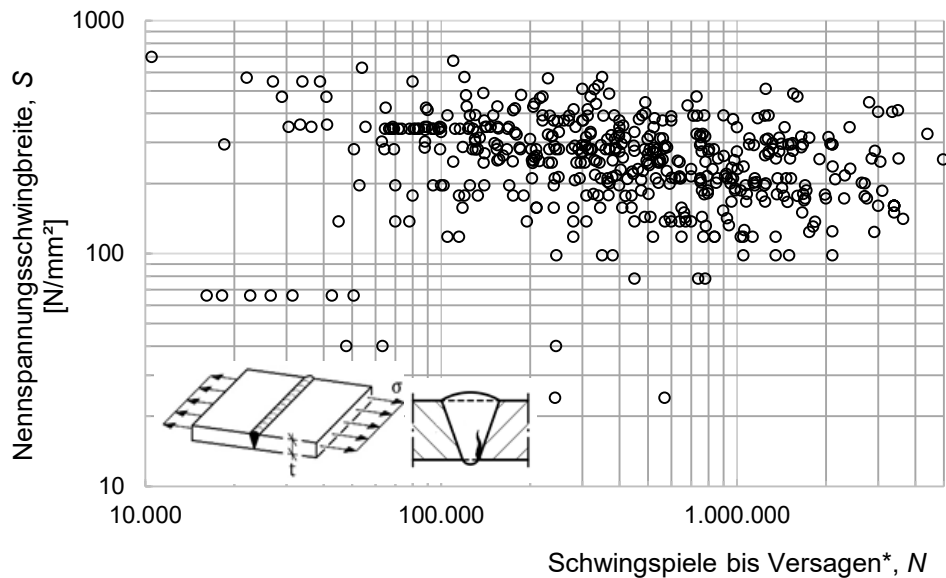


Bild 6-65: Gesamte Daten des Details „Einseitig geschweißte Stumpfstoße“-
 (Quellen IDs: #183, #238, #239, #243, #244, #245, #246, #247, #279, #305, #307, #308, #309)

Figure 6-65: Collected test results “Butt welds made from one side only”

6.3.7.2 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Der größte Teil der dokumentierten Bruchstellen ist, wie in Bild 6-66 dargestellt, an der Nahtwurzel zu finden. Gelingt eine kerbarme Ausführung der Nahtwurzel, ist jedoch auch ein Anriss am Nahtübergang der Oberseite möglich.



Bild 6-66: Bruchstelle in einseitig geschweißtem Stumpfstoß (Quellen ID: #308)

Figure 6-66: Fatigue crack in butt weld made from one side only

6.3.7.3 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

DIN EN 1993-1-9 [1] und die IIW-Empfehlungen [16] unterscheiden für das Detail 80313, ob die Nahtwurzel mithilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren untersucht wurde oder nicht. Wenn die Wurzel einer einseitig geschweißten Naht nicht überprüft werden kann, geht sowohl DIN EN 1993-1-9 [1] als auch den IIW-Empfehlungen [16] von der geringsten Ermüdungsfestigkeit aus: Kerbfall 36.

Wurde die Naht mit ZFP überprüft, kann der Kerbfall 71 angenommen werden. Da das Streufeld der Versuchsergebnisse keiner Normalverteilung folgt, kann eine sinnvolle statistische Auswertung für dieses Detail nicht durchgeführt werden.

In Bild 6-67 sind die experimentellen Daten im Vergleich mit Kerbfall 36 und Kerbfall 71 dargestellt. Für den Kerbfallvorschlag in Kapitel 10.4.5 wird eine Beibehaltung der derzeitigen Kerbfalleinstufung in DIN EN 1993-1-9 [1] empfohlen.

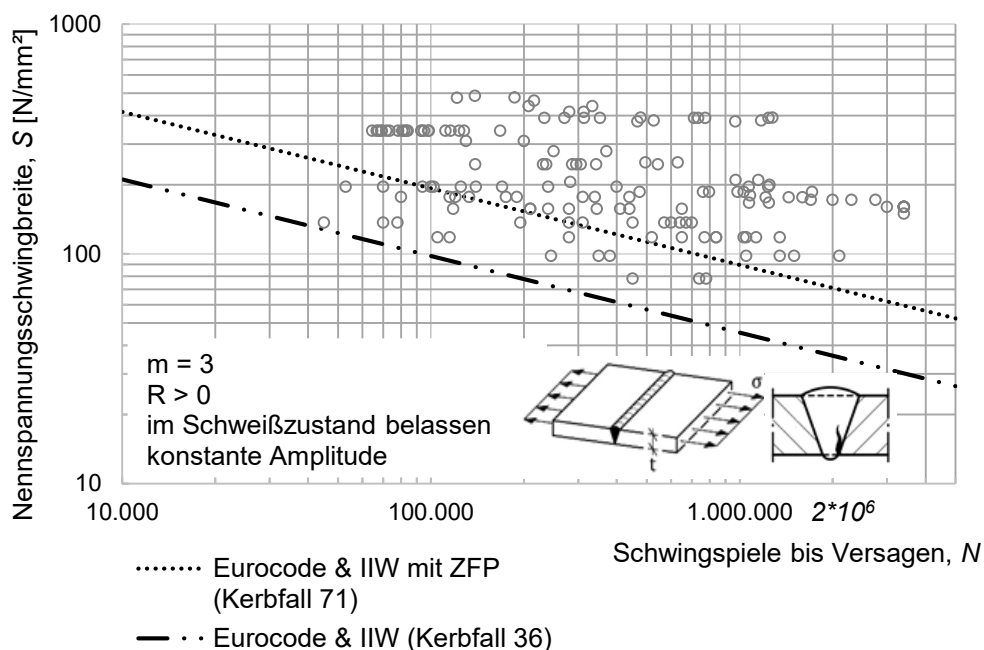


Bild 6-67: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „einseitig geschweißte Stumpfnäht“ mit der DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIW-Empfehlungen [16]

Figure 6-67: Comparison of characteristic S-N curves for “Butt welds made from one side only” with DIN EN 1993-1-9 [1] and IIW recommendations [16]

6.3.8 Einseitig geschweißte Stumpfnähte mit keramischer Schweißbadsicherung

Butt welds with ceramic backing

6.3.8.1 Übersicht

Overview

Das Detail bezieht sich auf Schweißnähte, die von einer Seite und mithilfe einer keramischen Schweißbadsicherung geschweißt werden. Für dieses Detail besteht momentan kein Kerbfall in DIN EN 1993-1-9 [1]. Das Schweißen auf der keramischen Schweißbadsicherung soll eine gute Wurzelqualität sicherstellen, ohne dass ein Schweißen der Gegenlage erforderlich ist.

6.3.8.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Der Umfang der bekannten experimentellen Versuche ist in Tabelle 6-44 dargestellt.

Tabelle 6-44: Übersicht Datengrundlage: Einseitig geschweißte Stumpfnähte mit keramischer Schweißbadsicherung

Table 6-44: Overview database: Butt welds with ceramic backing

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	148
Anzahl Quellen	6
Anzahl Serien	14

Eine Übersicht aller bekannten Versuchsergebnisse ist in Bild 6-68 dargestellt:

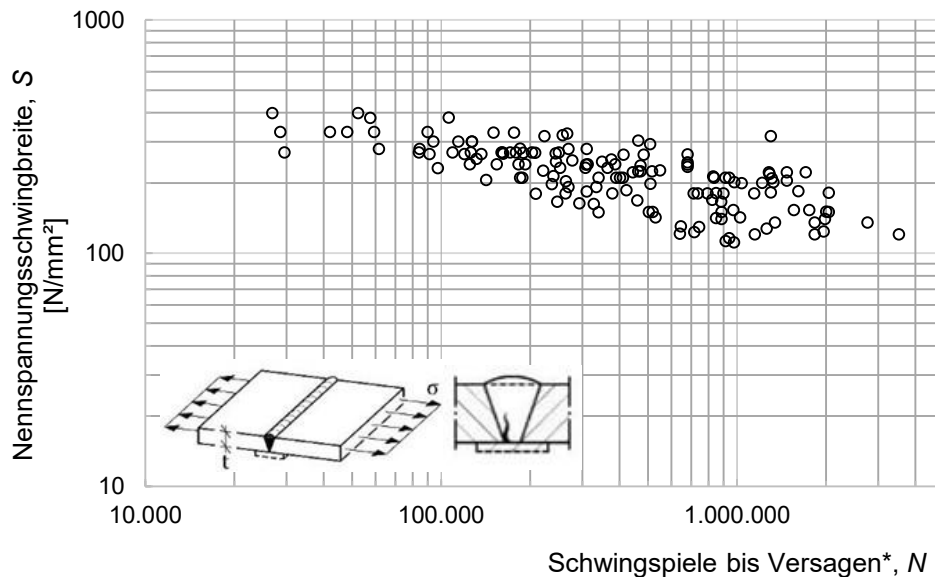


Bild 6-68: Gesamte Daten des Details „Einseitig geschweißte Stumpfnähte mit keramischer Schweißbadsicherung“ (Quellen IDs: #278, #279, #304, #307, #308, #301)

Figure 6-68: Collected test results “Butt welds with ceramic backing”

6.3.8.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Die experimentellen Untersuchungen zeigen deutlich, dass die Nahtwurzel durch die Schweißbadsicherung eine deutlich geringere Schwächung der Ermüdungsfestigkeit erfährt, als ohne Schweißbadsicherung.

Der Ursprung der Rissinitiierung ist in den Untersuchungen nicht durchgehend dokumentiert. Bei experimentellen Untersuchungen [72] wurde festgestellt, dass der Riss typischerweise von der Decklage ausgeht.

6.3.8.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

Für das Detail des einseitig geschweißten Stumpfstoßes mit keramischer Schweißbadsicherung ergibt die statistische Analyse der experimentellen Versuchsergebnisse Kerbfall 82, vgl. Bild 6-69.

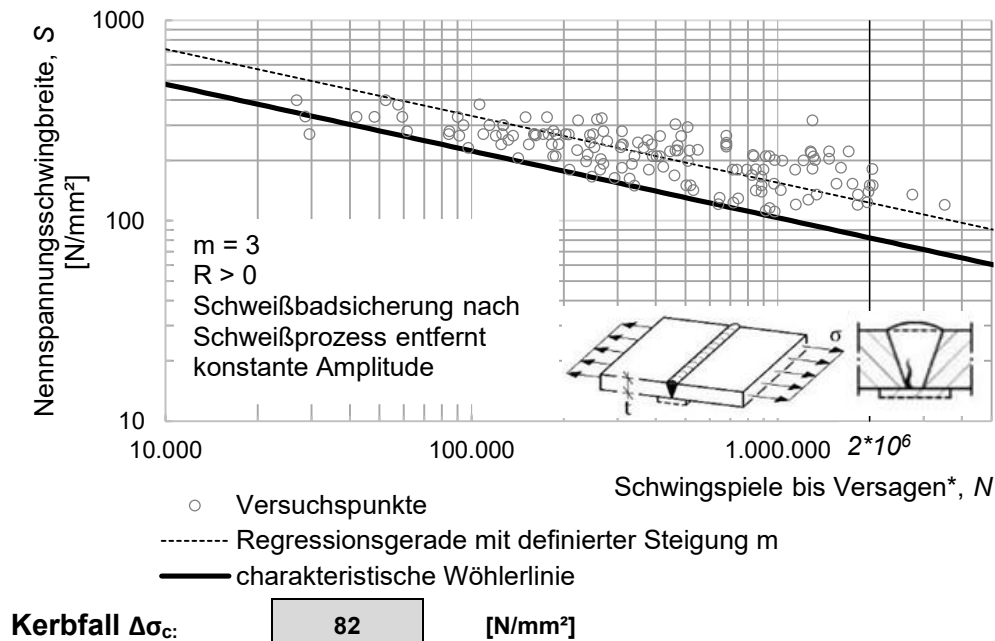


Bild 6-69: Kerbfalleitung des Details „Einseitig geschweißte Stumpfnähte mit keramischer Schweißbadsicherung“ (Quellen IDs: #278, #279, #304, #301, #307, #308)

Figure 6-69: Fatigue classification of Detail “Butt welds with ceramic backing”

Für die Auswertung wurden alle bekannten experimentellen Untersuchungen zusammengefasst. Es handelt sich dabei ausschließlich um Proben, bei denen die Decklage im Schweißzustand belassen wurde. In der Praxis wird das Detail auf der Oberseite häufig kerbfrei bearbeitet. Für diese Variante sind keine Versuche bekannt.

6.3.8.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

Die aktuelle Version der DIN EN 1993-1-9 [1] gibt für Stumpfnähte mit verbleibender Schweißbadsicherung den Kerbfall 71 an. Die IIW-Empfehlungen [16] setzen Kerbfall 80 für das Detail an. Die experimentellen Daten sind im Zusammenhang mit den charakteristischen Wöhlerlinien in Bild 6-70 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Kerbfalleinstufung der IIW-Empfehlungen mit Kerbfall 80 sehr nah an der charakteristischen Wöhlerlinie liegt, die sich aus den Versuchen in der Datenbank ergibt.

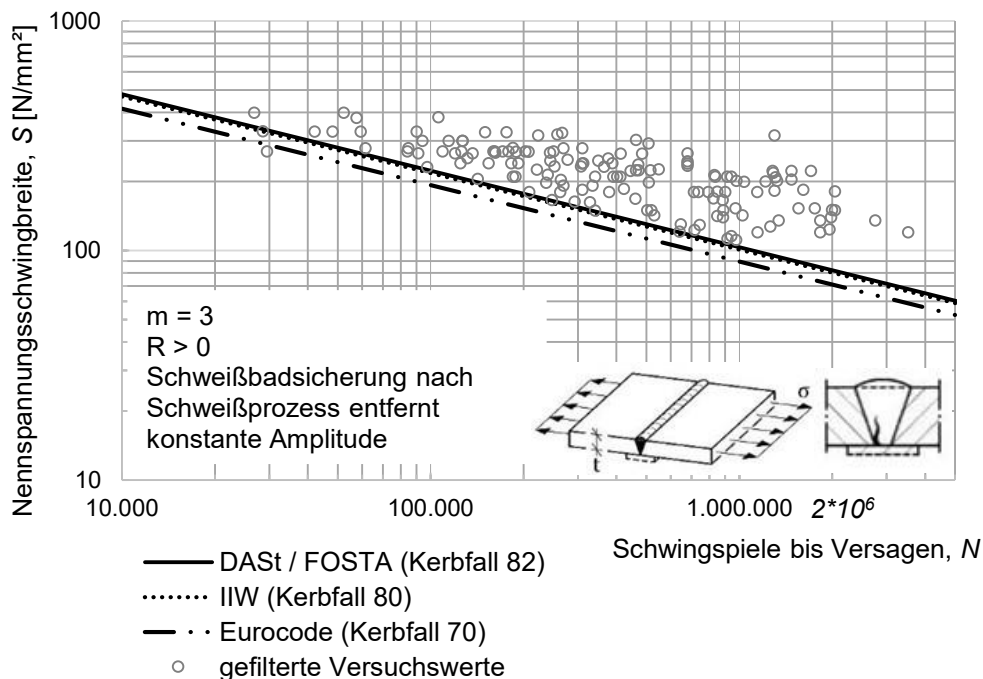


Bild 6-70: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „Einseitig geschweißte Stumpfnähte mit keramischer Schweißbadsicherung mit der DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIW-Empfehlungen [16]

Figure 6-70: Comparison of characteristic S-N curves for “Butt welds made from one side only” with DIN EN 1993-1-9 [1] and IIW recommendations [16]

Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Daten kann Kerbfall 80 für das im Schweißzustand belassene Konstruktionsdetail vorgeschlagen werden. Für das in der Praxis relevante Detail mit kerbfrei bearbeitetem Nahtübergang sind keine experimentellen Untersuchungen bekannt.

6.3.9 Stumpfnähte mit verbleibender Schweißbadsicherung

Butt welds with permanent backing

6.3.9.1 Übersicht


Overview

Das Detail beschreibt Konstruktionsdetails bei denen die Stumpfnähte mithilfe einer verbleibenden Schweißbadsicherung hergestellt werden. Dafür werden in der Regel Blechstreifen auf die Unterseite der Bleche geschweißt. Die experimentellen Untersuchungen zu diesem Detail beinhalten sowohl Varianten, bei denen die Heftnaht für die Schweißbadsicherung in die Nahtvorbereitung der Stumpfnah gesetzt wurde, als auch Varianten, bei denen die Schweißbadsicherungen an die Blechunterseite geschweißt wurden. Für den zweiten Fall ist zu beachten, dass die Schweißnaht für die Fixierung der Schweißbadsicherung ein eigenes Ermüdungsdetail darstellt.

Das korrespondierende Detail zu den Stumpfnähten mit verbleibender Schweißbadsicherung in DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-45 dargestellt.

Tabelle 6-45: Stumpfstöße mit verbleibender Schweißbadsicherung nach [1]

Table 6-45: Butt welds with permanent backing [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
71 (Detail 80314) $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$		14) Querstöße mit Schweißbadsicherung	Die Kehlnaht, mit der die Schweißbadsicherung angeschweißt wird, muss mindestens 10 mm von den Rändern des beanspruchten Bleches entfernt enden. Die Heftnaht muss innerhalb der späteren Stumpfnahnt liegen

6.3.9.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Die Datenbank enthält umfangreiche Versuchsdaten zu Stumpfnähten mit verbleibender Schweißbadsicherung, vgl. Tabelle 6-46.

Tabelle 6-46: Übersicht Datengrundlage: Einseitig geschweißte Stumpfnähte mit keramischer Schweißbadsicherung

Table 6-46: Overview database: Butt welds with ceramic backing

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	152
Anzahl Quellen	6
Anzahl Serien	10

Alle bekannten Versuchsergebnisse sind in Bild 6-71 dargestellt.

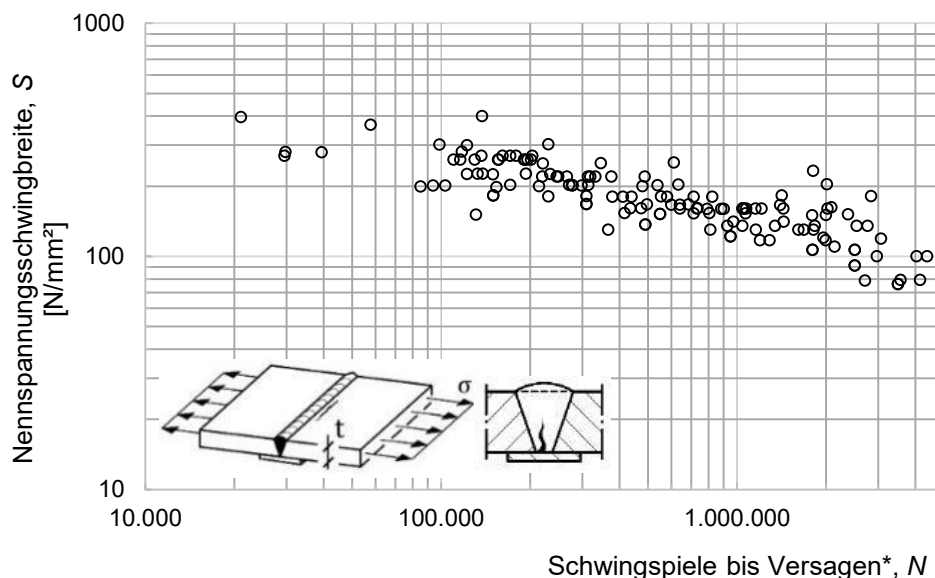


Bild 6-71: Gesamte Daten des Details „Stumpfnähte mit verbleibender Schweißbadsicherung“ (Quellen IDs: #12, #242, #279, #301, #307, #309)

Figure 6-71: Collected test results “Butt welds with permanent backing”

6.3.9.3 Versagensmerkmale

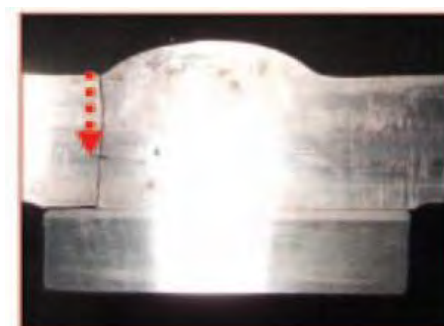
Failure characteristics

Der Versagensursprung in den Versuchen variiert. Newman und Gurney [45] konnten die deutliche Tendenz erkennen, dass der Rissbeginn an der Nahtwurzel, überdeckt von der Schweißbadsicherung, stattfindet, vgl. Bild 6-72 a).

Die Proben bei den Versuchen in [72] hingegen brachen zum größten Teil von dem Schweißnahtübergang aus, der sich gegenüber der Schweißbadsicherung befindet, vgl. Bild 6-72 b). Wenn die Heftstellen der Schweißbadsicherung nicht in der Naht selbst liegen, sind auch sie mögliche Anrissstellen. In DIN EN 1993-1-9 [1] wird dieser Fall jedoch ausgeschlossen.



(a)



(b)

Bild 6-72: Bruchstelle in Stumpfstößen mit verbleibender Schweißbadsicherung: (a) Versagen ausgehend von der Schweißnahtwurzel [40], (b) Versagen ausgehend vom Schweißnahtübergang [72]

Figure 6-72: Fatigue crack in specimens with permanent backing: (a) weld root failure [40], (b) weld toe failure [72]

6.3.9.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

Das Ergebnis der statistischen Auswertung, der in Bild 6-73 angegebenen Daten, entspricht dem Kerbfall 83.

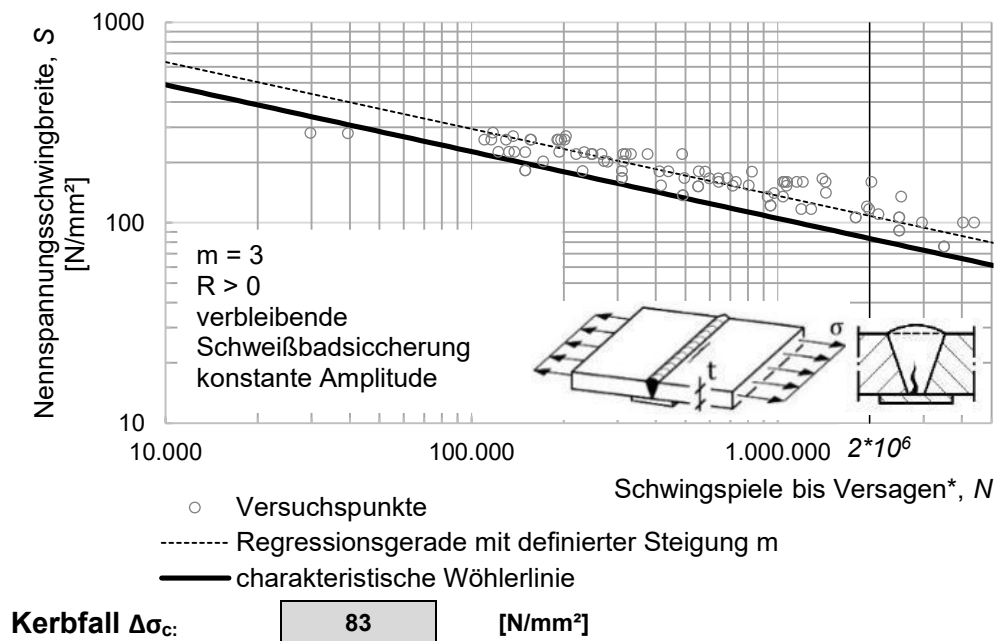


Bild 6-73: Kerbfalleitung des Details Stumpfnähte mit verbleibender Schweißbadsicherung (Quellen IDs: #12, #242, #279, #301, #307)

Figure 6-73: Fatigue classification of Detail “specimens with permanent backing”

6.3.9.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

Für dieses Detail hat auch Gurney [69] eine Datensammlung erstellt und ist bei der Ermittlung der mittleren Wöhlerlinie, wie in Bild 6-74 dargestellt, zu einem ganz ähnlichen Ergebnis gekommen wie die Auswertung der DAST/FOSTA Datensammlung.

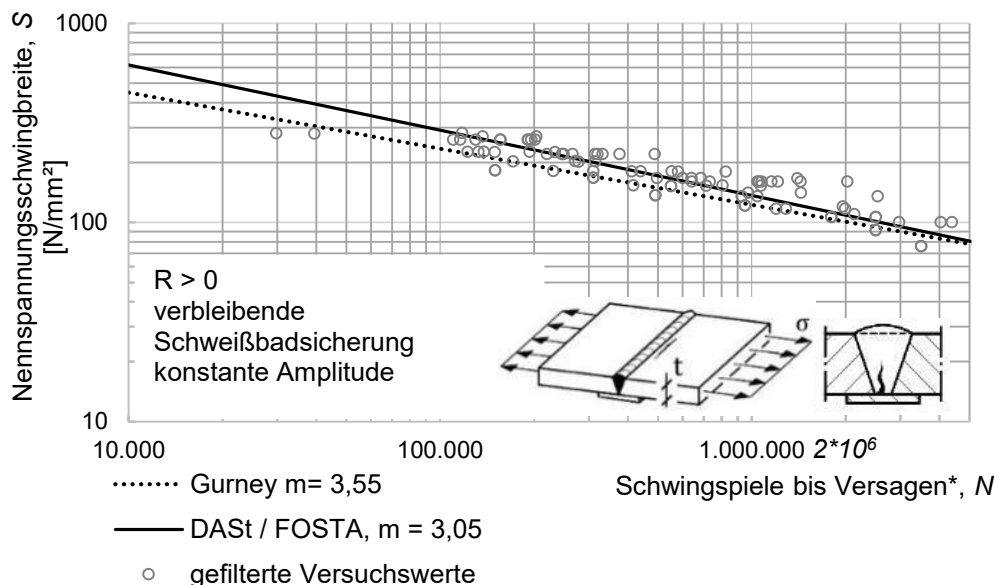


Bild 6-74: Vergleich mittlerer Wöhlerlinien des Details Stumpfnähte mit verbleibender Schweißbadsicherung mit [69]

Figure 6-74: Comparison of mean S-N curves of Detail “specimens with permanent backing” with [69]

Das Detail wird sowohl in DIN EN 1993-1-9 [1] als auch in den IIW-Empfehlungen [16] mit Kerbfall 71 bewertet. Der Eurocode definiert dabei zusätzliche Anforderungen an die Befestigung der Schweißbadsicherung, vgl. Tabelle 6-45.

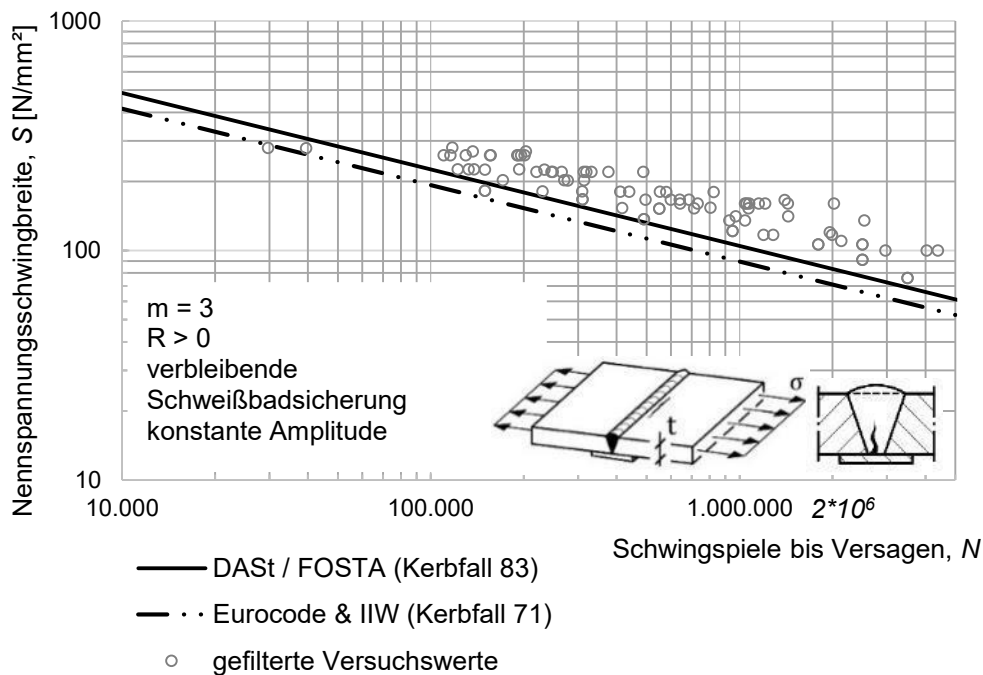


Bild 6-75: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „Stumpfnähte mit verbleibender Schweißbadsicherung“ mit der DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIW-Empfehlungen [16]

Figure 6-75: Comparison of characteristic S-N curves for “Specimens with permanent backing” with DIN EN 1993-1-9 [1] and IIW recommendations [16]

6.3.10 Stumpfstöße mit Dickensprung

Transverse butt welds with different thicknesses and without transition

6.3.10.1 Übersicht

Overview

Das Detail umfasst querlaufende Stumpfstöße, deren Bleche unterschiedliche Dicken aufweisen. Dabei wird kein kontinuierlicher Übergang vorgesehen, sondern die Schweißnaht überbrückt einen Dickensprung. Die Nennspannung wird für das kleinere Blech ermittelt. Das entsprechende Detail aus DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-47 dargestellt.

Tabelle 6-47: Stumpfstöße mit Dickensprung [1]

Table 6-47: Transverse butt welds with different thicknesses and without transition [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
<p>71 (Detail 80316)</p> <p>$t > 25$ mm:</p> <p>$k_s = (25/t)^{0,2}$</p>		<p>17) Quernaht zwischen Blechen unterschiedlicher Dicke ohne Übergang und ohne Exzentrizität</p>	/

Bei Vorhandensein einer Exzentrizität kann die daraus resultierende Zusatzbeanspruchung mithilfe eines Erhöhungsfaktors abgebildet werden. Die hier vorgestellten Daten beziehen sich auf Versuche an Prüfkörpern ohne Versatz.

6.3.10.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

In Tabelle 6-48 wird verdeutlicht, dass lediglich eine Quelle mit Versuchen zu diesem Detail bekannt ist. Mit vier verschiedenen Ausprägungen wurden dafür 35 Versuche vorgenommen. Die dazugehörigen Ergebnisse sind im Bild 6-76 dargestellt.

Tabelle 6-48: Übersicht Datengrundlage: Stumpfstöße mit Dickensprung

Table 6-48: Overview database: Transverse butt welds with different thicknesses and without transition

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	35
Anzahl Quellen	1
Anzahl Serien	4

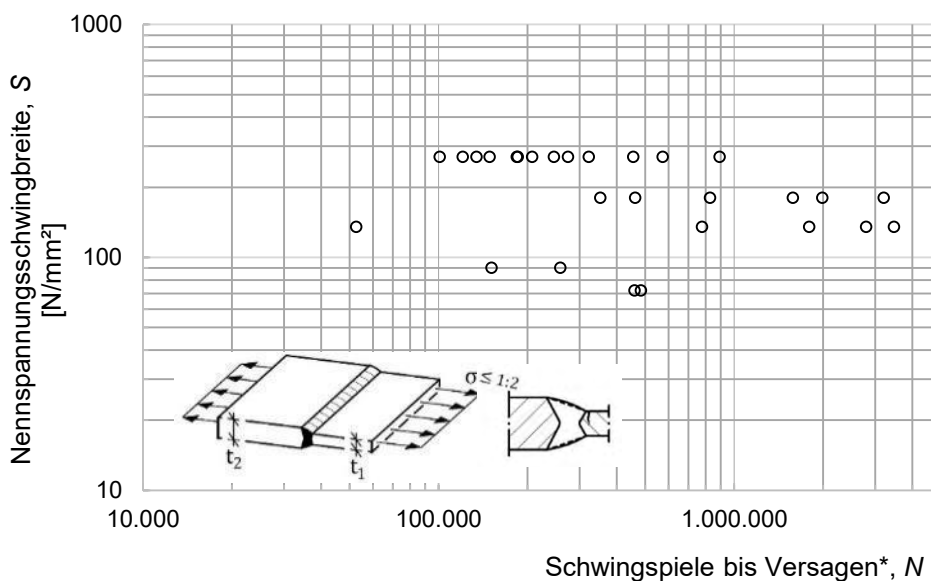


Bild 6-76: Gesamte Daten des Details „Stumpfstoß mit Dickensprung“ (Quellen IDs: #301)

Figure 6-76: Collected test results “Transverse butt welds with different thicknesses and without transition”

6.3.10.3 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

Die statistische Auswertung der verwertbaren Daten ergibt Kerbfall 94, welcher deutlich über dem Kerbfall 71 von DIN EN 1993-1-9 [1] liegt. Jedoch ist die Datengrundlage zur Herleitung eines Kerbfalles sehr klein.

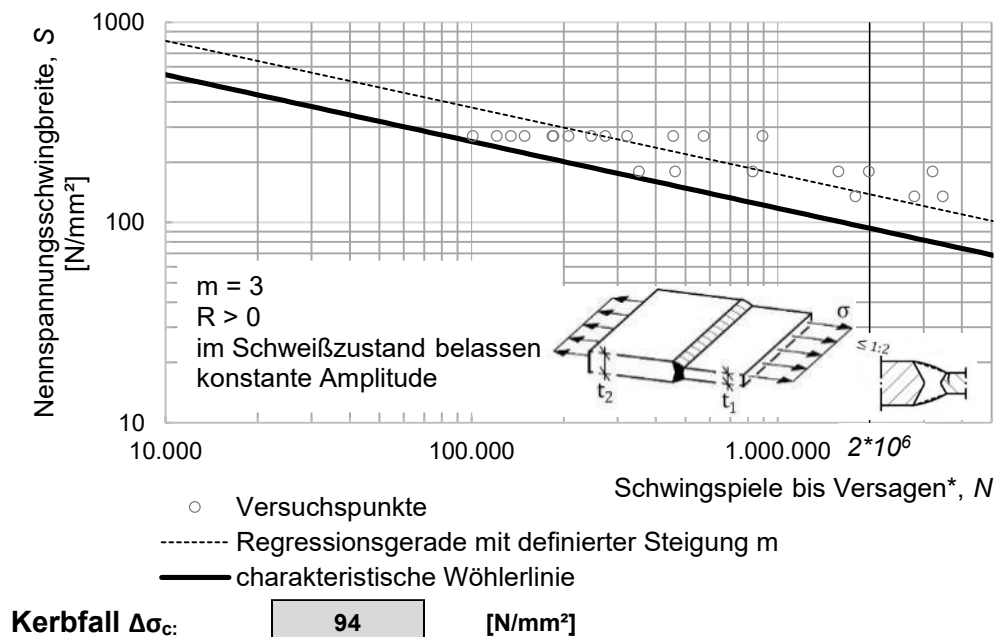


Bild 6-77: Kerbfalleitung des Details „Stumpfstoß mit Dicksprung“ (Quellen ID: #301)

Figure 6-77: Fatigue classification of detail “Transverse butt welds with different thicknesses and without transition”

6.3.10.4 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

DIN EN 1993-1-9 [1] und die IIW-Empfehlungen [16] verweisen auf den Kerbfall 71 für das Konstruktionsdetail. Die Auswertung der experimentellen Versuchsergebnisse ergibt eine bessere Einschätzung der charakteristischen Wöhlerlinie, deren Aussagekraft aufgrund des geringen bekannten Datenumfanges zu dem Detail jedoch eher gering ist.

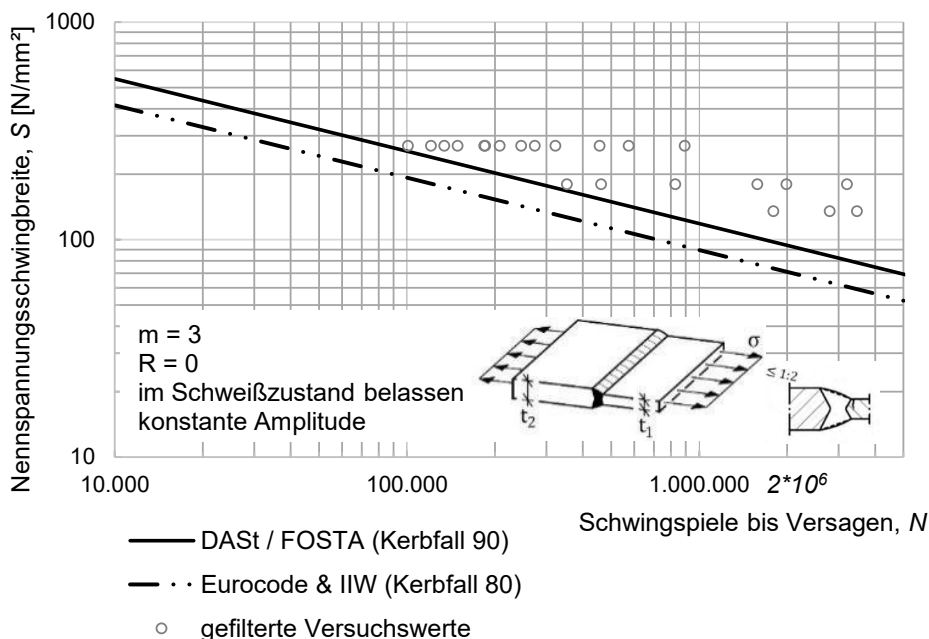


Bild 6-78: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „Stumpfstoß mit Dicksprung“ mit der DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIW-Empfehlungen [16]

Figure 6-78: Comparison of characteristic S-N curves for “Transverse butt welds with different thicknesses and without transition” with DIN EN 1993-1-9 [1] and IIW recommendations [16]

6.3.11 Lamellenstoß

Lamellae joint

6.3.11.1 Übersicht

Overview

Als Lamellenstoß wird der Stumpfstoß zweier übereinanderliegender Gurtbleche bezeichnet. Dabei werden die übereinanderliegenden Bleche mit einer sogenannten Stirnfugennaht verschweißt und die daraus entstandenen Blechpakete über einen Stumpfstoß gefügt. Die Nahtwurzel des Stumpfstoßes darf nicht auf der Höhe der Stirnfugennaht liegen. Das Konstruktionsdetail ist derzeit nicht Teil des Kerbfallkatalogs in DIN EN 1993-1-9 [1], ist aber für die nächste Generation bereits vorgesehen [73].

6.3.11.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Eine Übersicht der bekannten experimentellen Datengrundlage ist in Tabelle 6-49 gegeben.

Tabelle 6-49: Übersicht Datengrundlage: Lamellenstoß

Table 6-49: Overview database: Lamellae joint

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	65
Anzahl Quellen	2
Anzahl Serien	6

6.3.11.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Bei einem Lamellenstoß unter schwingender Belastung können drei verschiedene Versagensmodi beobachtet werden, die sich anhand der Positionierung des Rissbeginns unterscheiden. Besonders relevant sind die Schweißnahtübergänge, vgl. Bild 6-79 (a) sowie die Stirnfugennaht, vgl. Bild 6-79 (b). Teilweise entwickelten sich die Risse auch zeitgleich im Prüfkörper, vgl. Bild 6-79 (c).

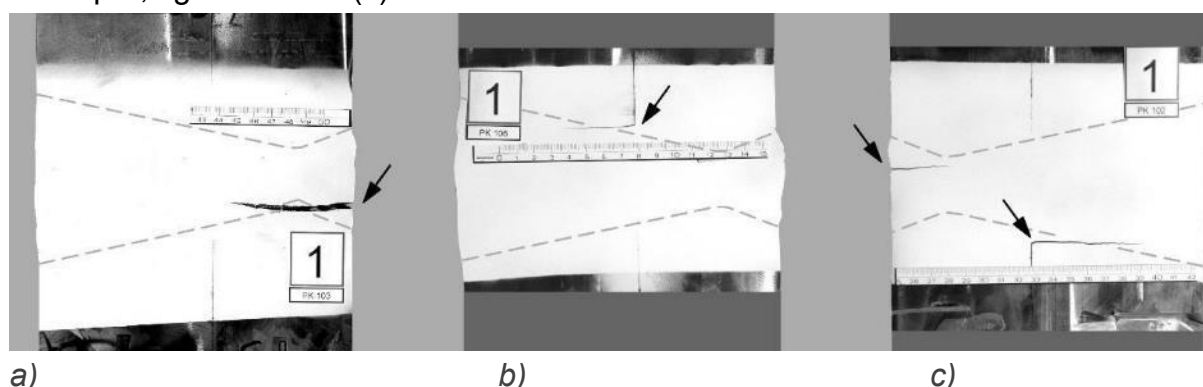
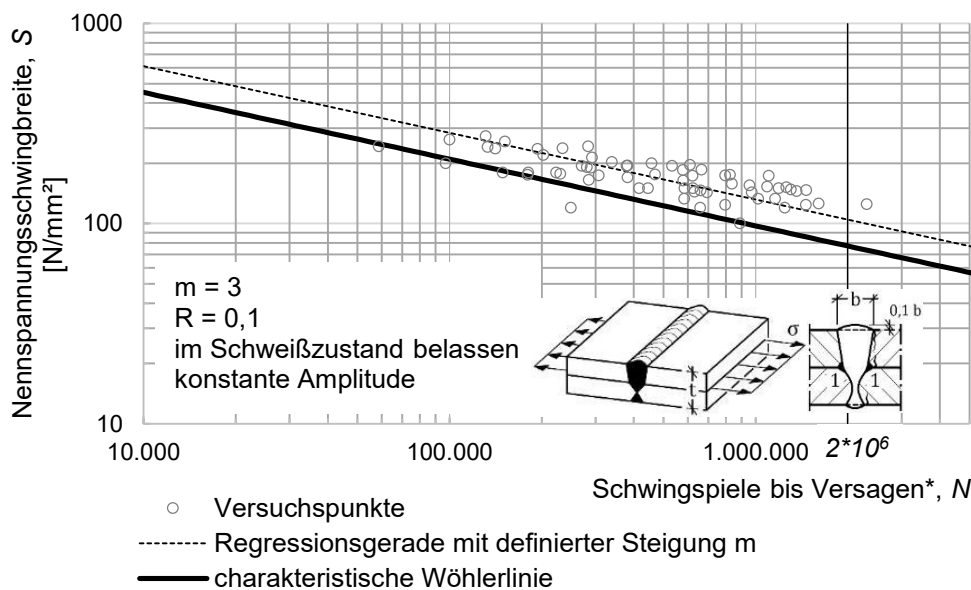


Bild 6-79: Bruchstellen Lamellenstoßprüfkörpern [73]

Figure 6-79: Fatigue cracks in lamellae joint specimens [73]

6.3.11.4 Kerbfallableitung

Fatigue class derivation



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 77 [N/mm²] (ohne Berücksichtigung Größeneinfluss)

Bild 6-80: Kerbfallableitung des Details „Lamellenstoß“ (Quellen ID: #1025)

Figure 6-80: Fatigue classification of detail “Lamellae joint”

Die experimentellen Untersuchungen in [73] wurden an Prüfkörpern im Dickblechbereich bis 180 mm durchgeführt. Die in Bild 6-80 dargestellten Ergebnisse sind jedoch Nennspannungen ohne Blechdickenkorrektur. Unter Berücksichtigung der Größenkorrektur wird in [73] Kerbfall 90 vorgeschlagen. Dementsprechend wird in Kapitel 10.4.9 ein Kerbfall 90 unter Berücksichtigung des Blechdickeneinflusses empfohlen.

6.4 Angeschweißte Anschlüsse und Steifen – Tabelle 8.4

Weld attachments and stiffeners – Table 8.4

6.4.1 Übersicht

Tabelle 8-4 der DIN EN 1993-1-9 [1] regelt die Ermüdungsfestigkeit von angeschweißten Blechen oder Steifen. Das beinhaltet Konstruktionsdetails, die auf eine dynamisch beanspruchte Struktur aufgeschweißt werden, jedoch selbst vorwiegend quasi statischer Beanspruchung ausgesetzt sind, wie z.B. Längssteifen, Quersteifen und Kopfbolzen. Die normativ festgelegten Ermüdungsfestigkeiten für diese Bauteile reichen von Kerbfallklasse 40 bis Kerbfallklasse 90. Der Kerbfallkatalog nach Eurocode 3 berücksichtigt in erster Linie geometrische Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit, bei der insbesondere die geometrischen Eigenschaften der aufgeschweißten Konstruktionen den Kerbfall beeinflussen.

6.4.2 Längssteife

Longitudinal attachment

6.4.2.1 Übersicht

Overview

In Tabelle 6-50 ist die Kerbfalleinstufung des Konstruktionsdetails „Längssteife“ dargestellt. Der Kerbfall ist nach DIN EN 1993-1-9 [1] unterteilt nach der Länge der Längssteife.

Tabelle 6-50: Längssteife mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Table 6-50: Longitudinal attachment with fatigue class classification according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Kerbfall		Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
80	$L \leq 50\text{mm}$		Die Kerbgruppe hängt von der Länge L der Längsrippe ab.	Die Dicke der Steifen muss kleiner sein als ihre Höhe, sonst siehe Tabelle 8.5, Kerbfall 5 oder 6.
71	$50 < L \leq 80\text{mm}$			
63	$80 < L \leq 100\text{mm}$			
56	$L > 100\text{mm}$			

6.4.2.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für die Ermüdungsfestigkeit des Konstruktionsdetails „Längssteife“ ist eine sehr umfangreiche Anzahl von Publikationen bekannt. Die Anzahl der in die Datenbank aufgenommenen experimentellen Untersuchungsergebnisse ist in Tabelle 6-51 dargestellt.

Tabelle 6-51: Übersicht Datengrundlage: Konstruktionsdetail Längssteife

Table 6-51: Overview Database: Fatigue detail Longitudinal attachment

Wöhlerversuche insgesamt	1421
Anzahl Quellen	32
Anzahl Serien	154
Anzahl Bauteilversuche	164

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Längssteife“ ist in Bild 6-81 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

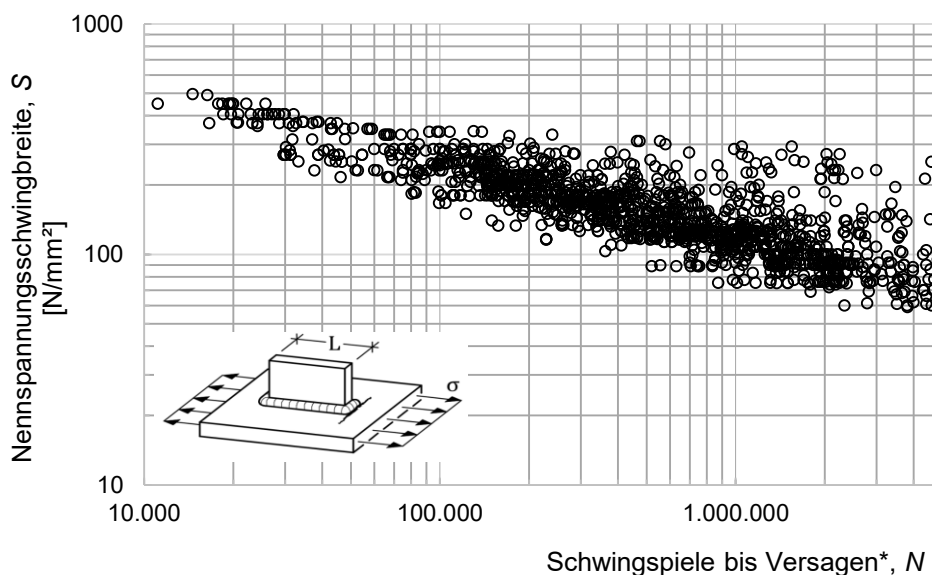


Bild 6-81: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail Längssteife (wie geschweißt)
 (Quellen IDs: #12, #47, #60, #62, #81, #116, #139, #140, #141, #142, #143, #144, #145, #147, #148, #149,
 #150, #151, #153, #155, #156, #157, #158, #159, #160, #163, #164, #260, #301, #1003, #1014, #1021)

Figure 6-81: Figure of experimental fatigue test data for detail: Longitudinal attachment (as welded)

6.4.2.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

In allen für die Datenbank ausgewerteten Quellen mit dokumentierten Versagensmerkmalen wird der Schweißnahtübergang am Stirnende der Längssteife als dominanter Versagensort beschrieben. In einigen wenigen experimentellen Untersuchungen [40] wird auch ein Ermüdungsanriss von der Wurzel ausgehend beobachtet. In Bild 6-82 sind Versagensbeispiele dokumentiert.

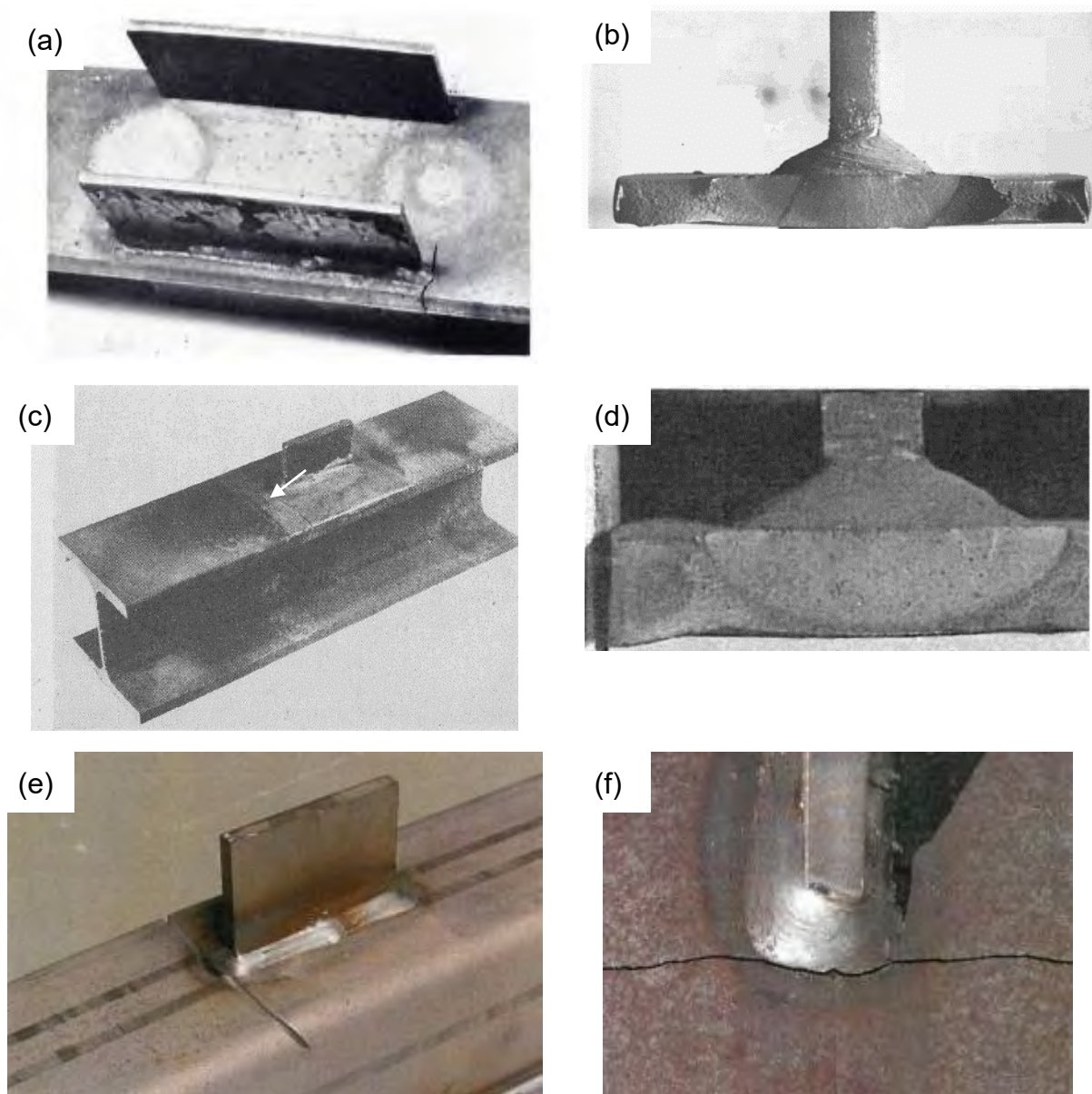


Bild 6-82: Versuchskörper mit Ermüdungsriss an Längssteife [74], [75], [76], [77], [40]

Figure 6-82: Specimens with fatigue crack at longitudinal attachment [74], [75], [76], [77], [40]

6.4.2.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influencing parameters in resistance side

Längeneinfluss Längssteife

In [78], S. 119-121 wird der Einfluss der Längssteife auf Grundlage von experimentellen Untersuchungen diskutiert. Es wird festgestellt, dass die Länge der Längssteife einen kleinen Effekt auf die Ermüdungsfestigkeit haben könnte. Es wird empfohlen, für lange Längssteifen einen reduzierten Kerbfall anzunehmen. In DIN EN 1993-1-9 [1] hat die Länge L der Längssteife einen deutlichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. In Kapitel 9.2.5.1 ist eine ausführliche Auswertung unter Berücksichtigung des Parameters L gegeben.

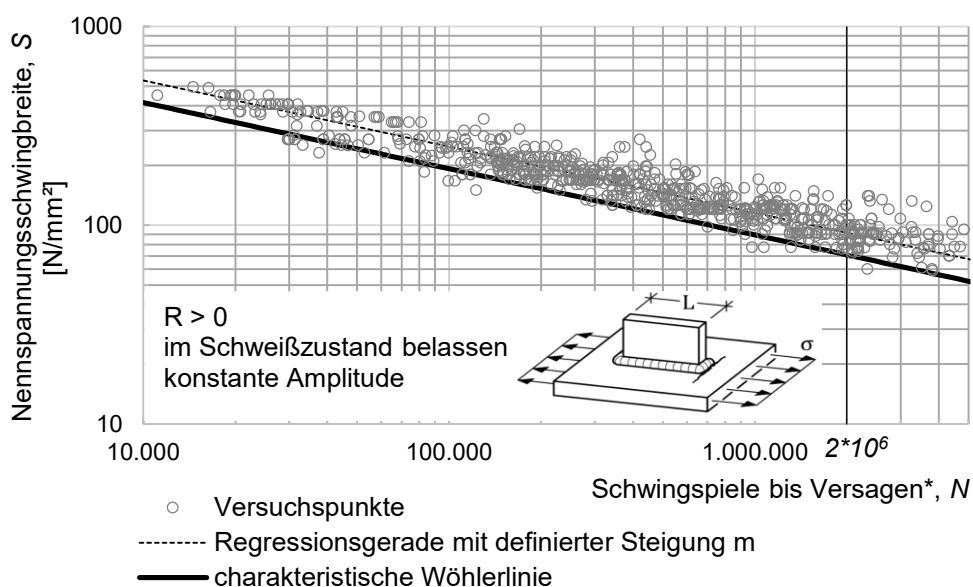
Schweißart und Schweißfolge

Untersuchungen in [40] zeigen, dass die Schweißfolge einen deutlichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben kann. Die Stirnseiten der Längssteifen sollten ohne Unterbrechung geschweißt werden da Ansatzstellen sich an den Stirnseiten der Längssteife negativ auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken.

6.4.2.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

Der übliche Anwendungsbereich für Längssteifen, insbesondere im Brückenbau, liegt bei über 100 mm Steifenlänge. Für die im Bild 6-83 dargestellte statistische Auswertung des Kerbfalls wurden jedoch neben den im Bild beschriebenen Filterkriterien keine Unterteilungen hinsichtlich der verschiedenen Längen vorgenommen. Ein signifikanter Längeneinfluss, wie er z.B. in DIN EN 1993-1-9 [1] oder in den Kerbfallempfehlungen des IIW [16] gegeben ist, kann anhand der vorliegenden Daten nicht bestätigt werden, siehe auch Kapitel 9.2.5.1.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 73 [N/mm²]

Bild 6-83: Kerbfallableitung rechteckige Längssteife anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #47, #60, #81, #116, #139, #141, #143, #145, #164, #149, #150, #151, #153, #148, #158, #164, #260, #301, #1002, #1014, #1028)

Figure 6-83: Fatigue classification of rectangular longitudinal attachment

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 71 und liegt damit über der derzeit gültigen Kerbfallklasse in EN1993-1-9 [1] für Längssteifen mit L größer 80 mm.

6.4.2.6 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

In Bild 6-84 ist ein Vergleich der mittleren Wöhlerlinien aus dem DVS Wöhlerlinienkatalog für Längssteifen [79], der Gurney Datensammlung für nicht direkt belastete Längsnähte [69], sowie der DAST/FOSTA Datensammlung gegeben. Die DAST/FOSTA Datensammlung beinhaltet alle Quellen aus [69] und [79], die jedoch aufgrund der Filterkriterien nur

teilweise für die Kerbfallauswertung herangezogen wurden. [69] und [79] unterscheiden bei der Auswertung nicht hinsichtlich der Länge der Längssteife.

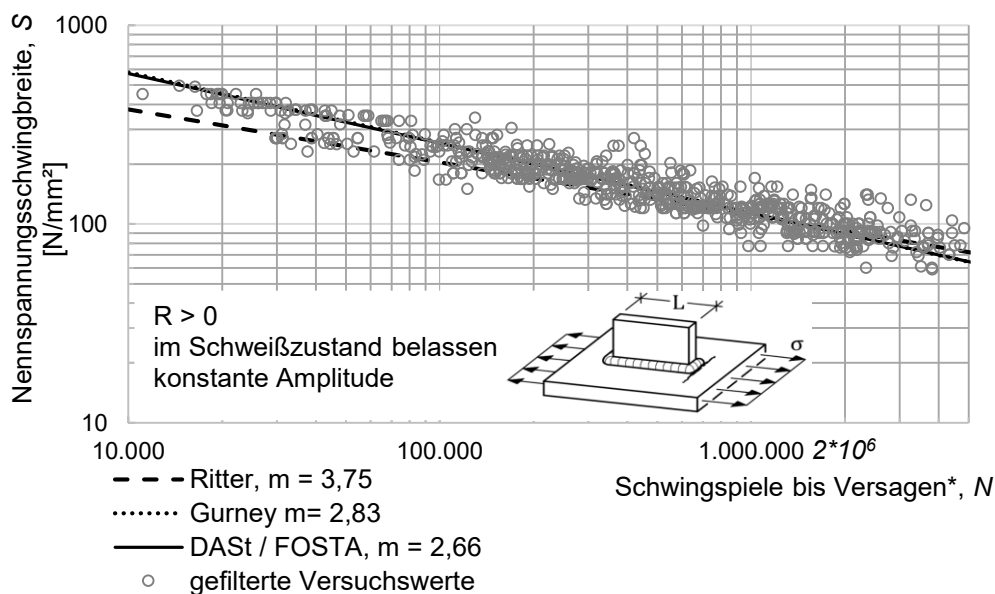


Bild 6-84: Vergleich mittlerer Wöhlerlinien mit [69] und [79]

Figure 6-84: Comparison of mean S-N curves with [69] and [79]

Die mittlere Wöhlerlinie von Gurney [69] passt sehr gut mit der mittleren Wöhlerlinie zusammen, die anhand der gefilterten Versuchspunkte aus der DAST/FOSTA Datenbank abgeleitet wurden.

In Bild 6-85 ist die charakteristische Wöhlerlinie der Längssteife im Vergleich zu den Bemessungswöhlerlinien aus den IIW-Empfehlungen [16] und der EN1993-1-9 [1] dargestellt. In den IIW-Empfehlungen [16] wird ebenfalls ein Längeneinfluss unterstellt, der sich aber erst bei größeren Längen den Kerbfall reduziert. Eine ausführliche Betrachtung des Längeneinflusses anhand der gesammelten experimentellen Daten, sowie mithilfe eines FE Modells, ist in 9.2.5.1 gegeben.

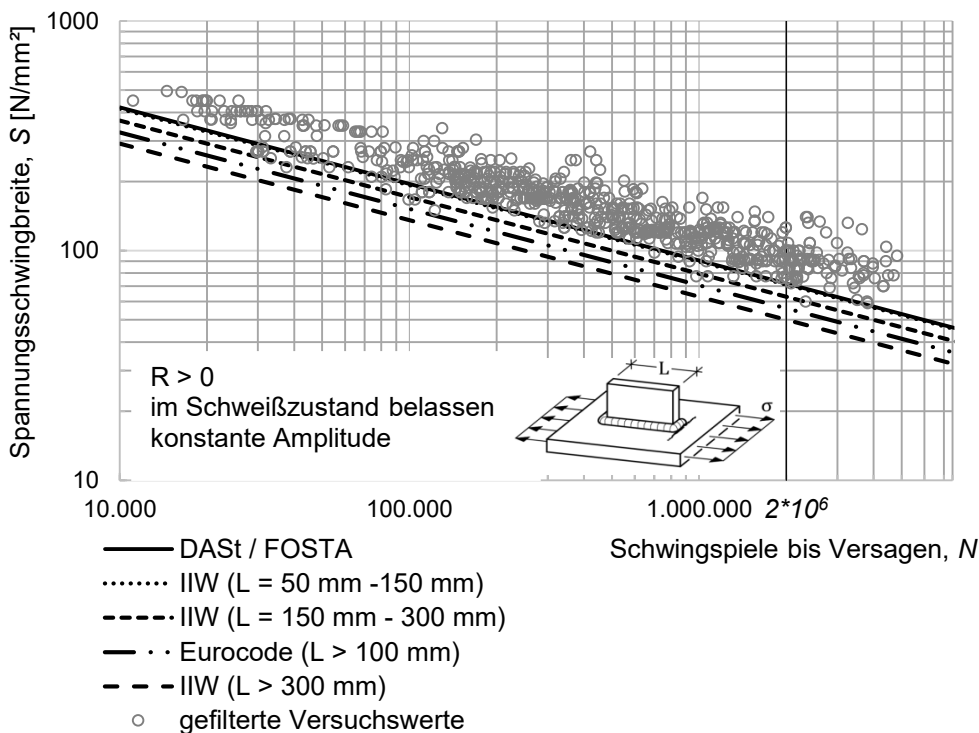


Bild 6-85: Vergleich charakteristischer Wöhlerlinien mit [1] und [16]
 Figure 6-85: Comparison of characteristic S-N curves with [1] and [16]

6.4.3 Längssteife mit Anfasung

Longitudinal attachment chamfered

6.4.3.1 Übersicht

Overview

Das Konstruktionsdetail entspricht einer Längssteife, bei dem die Stirnseiten angefasst wurden. Das korrespondierende Detail in DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-50 dargestellt.

Tabelle 6-52: Längssteife mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Table 6-52: Longitudinal attachment with fatigue class classification according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
71 L > 100 mm $\alpha > 45^\circ$		2) Längsrippen an ebenen oder gekrümmten Blechen	/

Der Anstiegswinkel der Fasung muss kleiner als 45° sein. Das Detail ist für Längssteifen mit einer Länge L größer als 100 mm mit Kerbfall 71 angegeben. Der Kerbfall gilt wie die Längssteifen ohne Anfasung an den Stirnseiten für im Schweißzustand belassene Details. Nicht klar definiert ist die notwendige Schweißnahtkantenvorbereitung an den Stirnseiten. Um eine Umschweißung zu gewährleisten, muss ein kleiner Schweißsteg an den Enden

der Bleche stehen gelassen werden. In [80] werden Längssteifen mit Anfasung untersucht und mit einfachen Längssteifen verglichen. Die Untersuchungen zeigen, dass die Anfasung am Blechende, in Bezug auf die Ermüdung, keinen Vorteil gegenüber der rechteckigen Längssteife aufweist.

6.4.3.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Die Anzahl der bekannten experimentellen Daten zum Konstruktionsdetail ist in Tabelle 6-53 zusammengestellt.

Tabelle 6-53: Übersicht Datengrundlage: Konstruktionsdetail Längssteife mit Anfasung

Table 6-53: Overview Database: Fatigue detail longitudinal attachment chamfered

Wöhlerversuche insgesamt	153
Anzahl Quellen	3
Anzahl Serien	7
Anzahl Bauteilversuche	107

Die Darstellung aller bekannten Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Längssteife mit Anfasung“ ist in Bild 6-85 dargestellt.

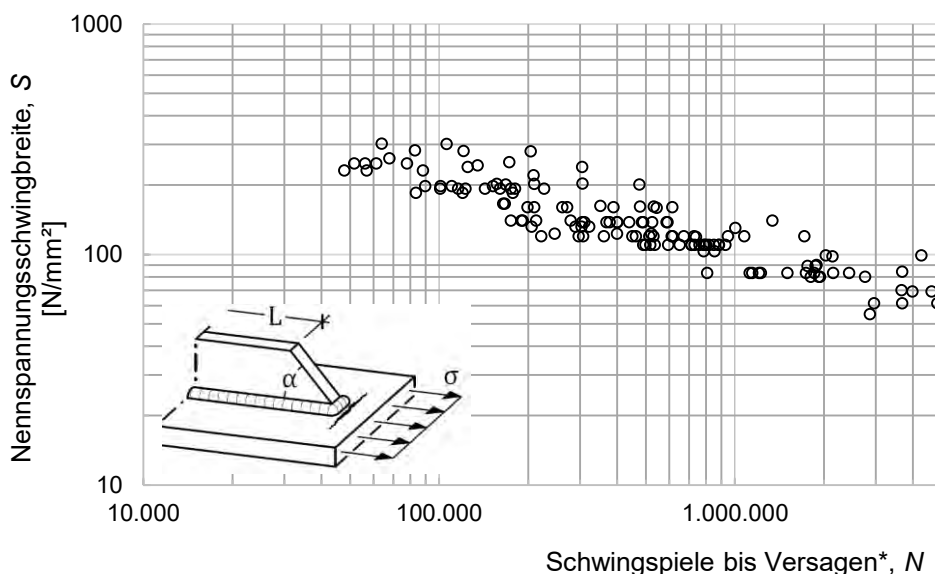


Bild 6-86: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail Längssteife mit Anfasung (Quellen IDs: #73, #141, #301)

Figure 6-86: Figure of experimental fatigue test data for detail: “Longitudinal attachment chamfered”

6.4.3.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Ähnlich wie bei rechteckigen Längssteifen bildet sich der Ermüdungsriß am Schweißnahtübergang auf der Stirnseite aus.

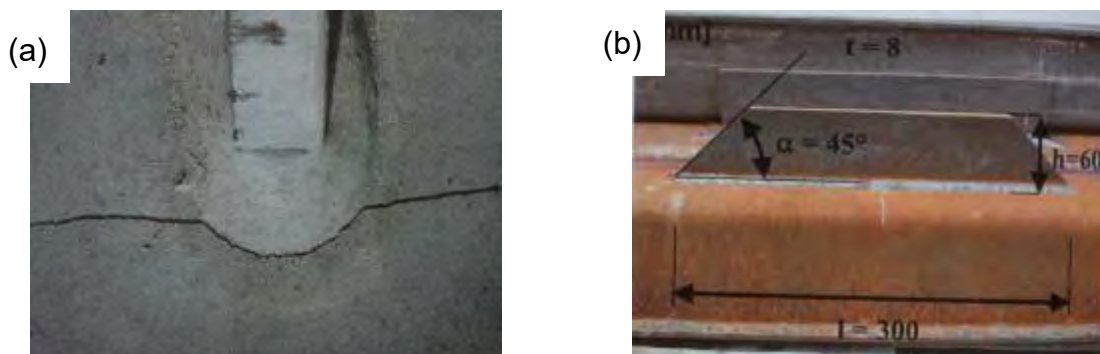


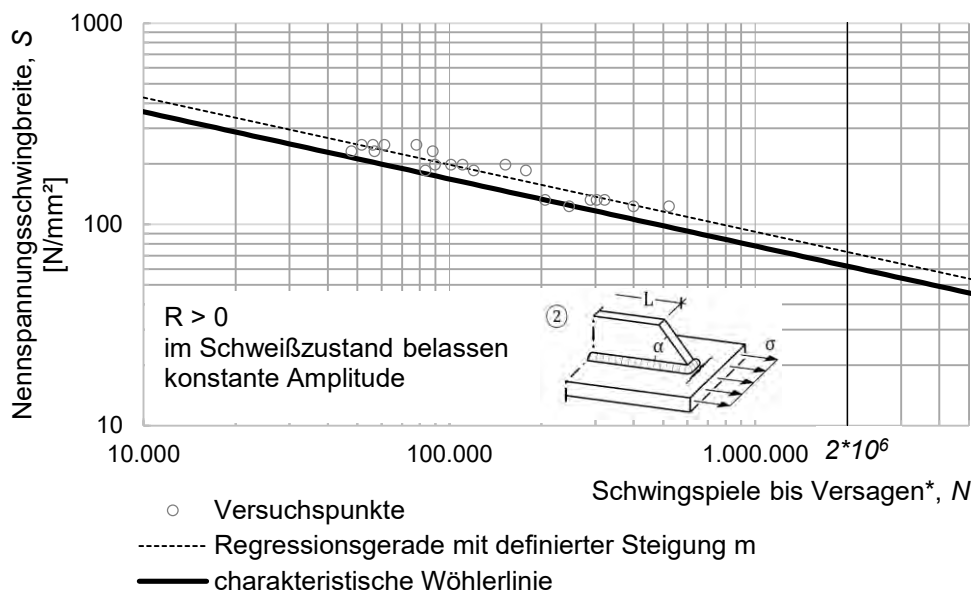
Bild 6-87: Versuchskörper mit Ermüdungsriss an angefaseter Längssteife: Ermüdungsriss (a), Prüfkörper (b) [40]

Figure 6-87: Specimens with fatigue crack on chamfered longitudinal attachment: fatigue crack (a), specimen (b) [40]

6.4.3.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

Die statistische Auswertung der gefilterten experimentellen Daten liefert Kerbfall 64, siehe Bild 6-88. Dass der Kerbfall tiefer liegt als das in Kapitel 6.4.2 beschriebene Detail, scheint unplausibel. Eine abschließende Erklärung konnte nicht gefunden werden. Auffällig ist, dass alle Ermüdungsversuche in [40] (Quelle #301), die einen Großteil der verwertbaren Ergebnisse darstellen, generell tiefe Ermüdungsfestigkeiten aufwiesen. Alle Versuche in [40] wurden an hochfesten Baustählen durchgeführt. Für einige der Versuche ist dokumentiert, dass die Ansatzstelle im ermüdungskritischen Bereich lag.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 64 [N/mm²]

Bild 6-88: Kerbfallableitung angefasete Längssteife anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #71, #301)

Figure 6-88: Fatigue classification of chamfered longitudinal attachment

6.4.3.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

Neben DIN EN 1993-1-9 [1] (Kerbfall 71) wird das Detail mit angefaster Längssteife auch im Kerbfalkatalog des IIW beschrieben. Für die Variante mit einem Nahtanstiegswinkel $\alpha \geq 20^\circ$ wird Kerbfall 63 empfohlen, vgl. Bild 6-89. Statistische Auswertungen von Datensammlungen zu diesem Detail sind nicht bekannt.

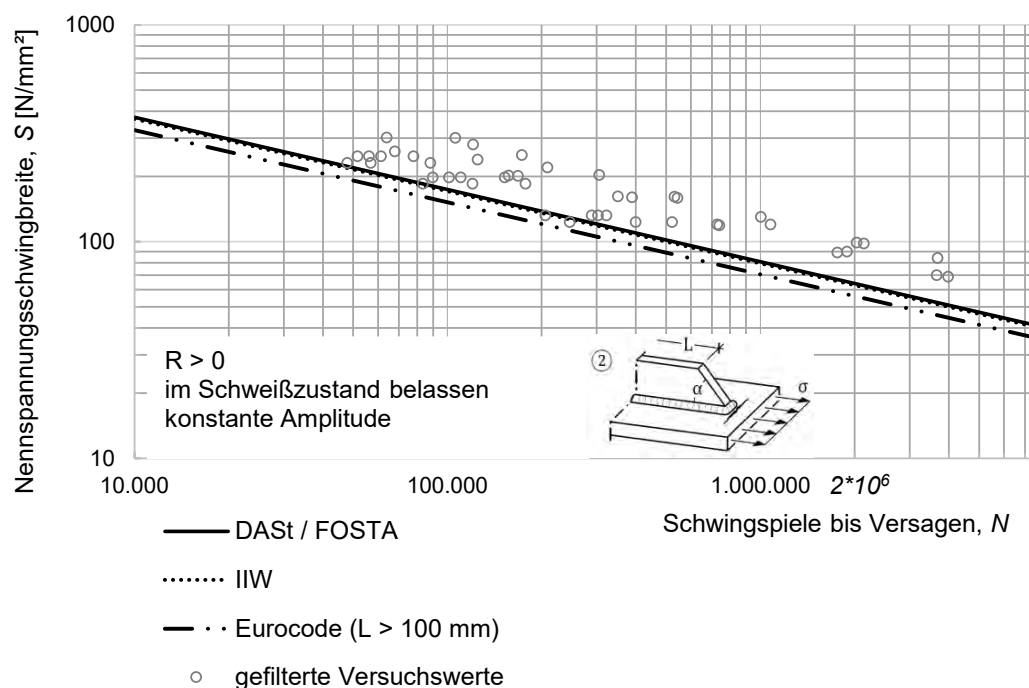


Bild 6-89: Vergleich charakteristischer Wöhlerlinien mit [1] und [16]

Figure 6-89: Comparison of characteristic S-N curves with [1] and [16]

6.4.4 Längssteife mit Radius und kerbfrei bearbeitetem Kerbübergang

Longitudinal attachment with radius and smooth transition

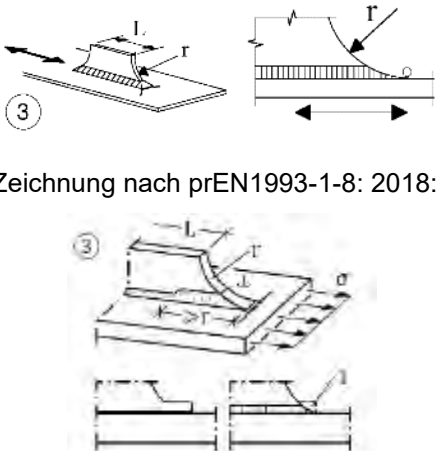
6.4.4.1 Übersicht

Overview

Das Konstruktionsdetail ist eine verbesserte Variante der Längssteife. Der Ursprung des Konstruktionsdetails ist jedoch unbekannt. Bis auf einige Untersuchungen in [40] an hochfesten Stählen sind keine Versuchsergebnisse zu diesem Detail bekannt. Das entsprechende Detail im Eurocode ist in Tabelle 6-54 dargestellt. In der prEn 1993-1-9 wurde bereits ein überarbeitetes Konstruktionsdetail aufgenommen, vgl. Konstruktionsdetail in Tabelle 6-54. Die Endverstärkung der Kehlnaht an den Enden muss voll durchgeschweißt sein. Für die erforderliche Nachbearbeitung des Details muss dafür in der Schweißnahtvorbereitung ein Steg stehen gelassen werden, der nach der Bearbeitung für einen ebenen Übergang vom Blech zur Steife, mit einem bestimmten Radius geschliffen wird.

Tabelle 6-54: Längssteife mit Radius und geschliffenem Kerbübergang: Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Table 6-54: Longitudinal attachment with radius transition and smooth transition with fatigue class classification according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
<p>80 r > 150 mm</p>	 <p>Zeichnung nach prEN1993-1-8: 2018:</p>	<p>3) Längsschweißte Anschlussbleche mit Ausrundung an ebenen oder gekrümmten Blechen, Endverstärkung der Kehlnaht (voll durchgeschweißt); Länge der Verstärkungsnah > r</p>	<p>Am Knotenblech muss ein gleichmäßiger Übergang hergestellt werden, und zwar vor dem Schweißen mit dem Radius r durch maschinelle Bearbeitung oder Brennschneiden und nach dem Schweißen durch Schleifen der Schweißzone parallel zur Lastrichtung, so dass der Schweißnahtübergang der Quernaht vollständig entfernt ist.</p>

In Bild 6-90 sind Längssteifen mit Ausrundung und Abschrägungen dargestellt, die in der Schiersteiner Brücke verbaut sind.

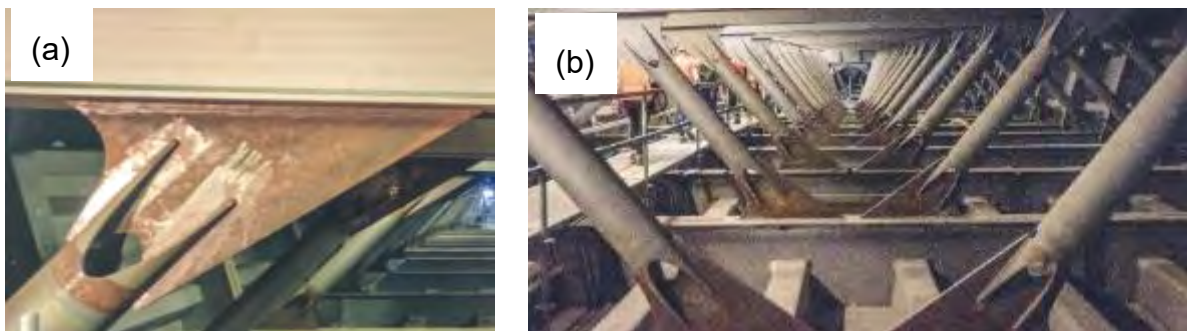


Bild 6-90: Längssteifen an Querträgern mit Abschrägungen und Abrundungen: Schiersteiner Brücke

Figure 6-90: Longitudinal attachments chamfered and with radius transition: Schierstein Bridge

6.4.4.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Den Autoren ist nur eine Quelle bekannt, in denen Wöhlerversuche für Längssteifen mit Kerbradius und bearbeiteten Kerbübergang durchgeführt wurden [40] (Quelle #301). Die Untersuchungen liefern ähnlich wie für die abgeschrägten Längssteife (vgl. Kapitel 6.4.3.2) keine plausiblen Werte für die Ermüdungsfestigkeit. Auf eine statistische Auswertung der Versuchsdaten wird verzichtet.

6.4.4.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Aufgrund der geringen Anzahl der vorliegenden Versuche können keine verlässlichen Aussagen zu Versagensmerkmalen gemacht werden. In Bild 6-91 ist ein Ermüdungsriss an einer Längssteife mit Radius und im geschliffenem Kerbübergang dargestellt.

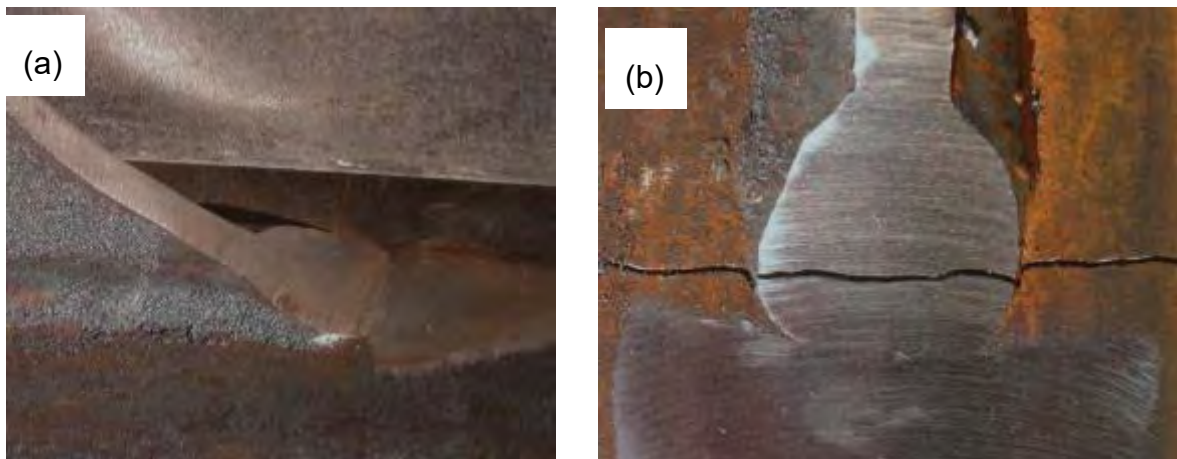


Bild 6-91: Prüfkörper Längssteife mit Radius und geschliffen Kerbübergang (a), Ermüdungsriß (b)
 Figure 6-91: Specimen longitudinal attachment with radius and smooth transition (a) fatigue crack (b)

6.4.5 Längssteife am Bauteilrand

Gusset plate


6.4.5.1 Übersicht

Overview

Das Konstruktionsdetail entspricht einer Längssteife, die auf der Dickenseite eines Bleches angeschweißt wird. Einschränkungen oder Anforderungen zur Schweißvorbereitung sind in DIN EN 1993-1-9 [1] nicht gegeben, vgl. Tabelle 6-55.

Tabelle 6-55: Längssteife am Bauteilrand: Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Table 6-55: Gusset plate with fatigue class classification according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
40		5) Ohne Nachbehandlung, ohne Ausrundungsradius	/

Da die Blechdicke des Grundbleches in der Regel nicht ausreichend ist, um die Längssteife mit Kehlnähten aufzusetzen, muss die Längssteife in der Regel mit einer versenkten Naht angeschlossen werden.

Das Kerbdetail verhält sich ähnlich wie die Längssteife, die senkrecht zu Walzebene aufgeschweißt wird. Jedoch breitet sich bei der Längssteife am Bauteilrand der Ermüdungsriß schon früh über die komplette Bauteilflanke aus, was Risswachstum stark begünstigt [81].

6.4.5.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Das Konstruktionsdetail ist insgesamt gut mit experimentellen Versuchsergebnissen belegt, siehe Tabelle 6-56.

Tabelle 6-56: Übersicht Datengrundlage: Konstruktionsdetail Längssteife am Bauteilrand

Table 6-56: Overview Database: Fatigue detail gusset plate

Wöhlerversuche insgesamt	1138
Anzahl Quellen	13
Anzahl Serien	51
Anzahl Bauteilversuche	58

Eine Übersicht aller Versuchsergebnisse zur Längssteife am Bauteilrand in der DASt/FOSTA Datenbank ist in Bild 6-92 gegeben:

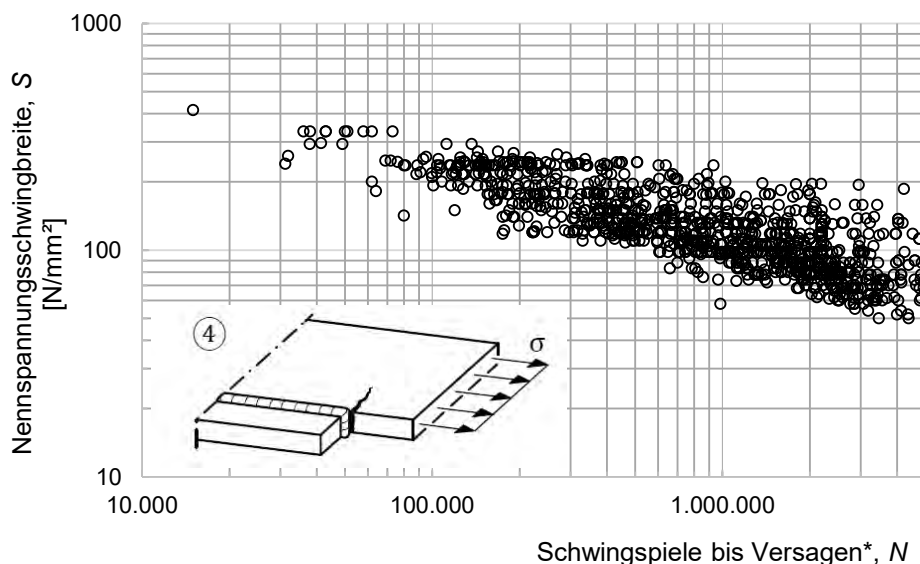


Bild 6-92: Darstellung aller bekannten Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail: Längssteife am Bauteilrand (Quellen IDs: #18, #96, #102, #116, #141, #162, #163, #164, #165, #167, #168, #169, #170)

Figure 6-92: Figure of experimental fatigue test data for detail: "Gusset plate"

6.4.5.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Der Ermüdungsanriss für das im Schweißzustand belassene Konstruktionsdetail entsteht am Ende der Längssteife am Schweißnahtübergang, vgl. Bild 6-93.

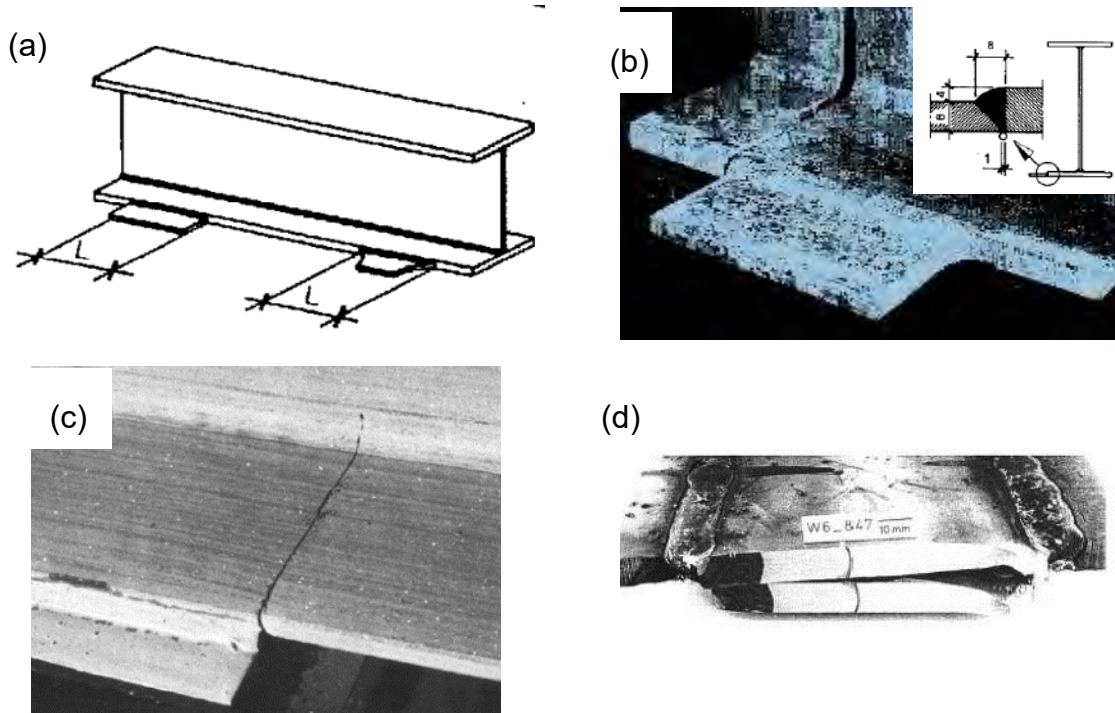


Bild 6-93: Ermüdungsriss am Nahtübergang Längssteife am Bauteilrand: Beispiel für Prüfkörpergeometrie (a), Versagensbilder (b – d) [81] [82] [83]

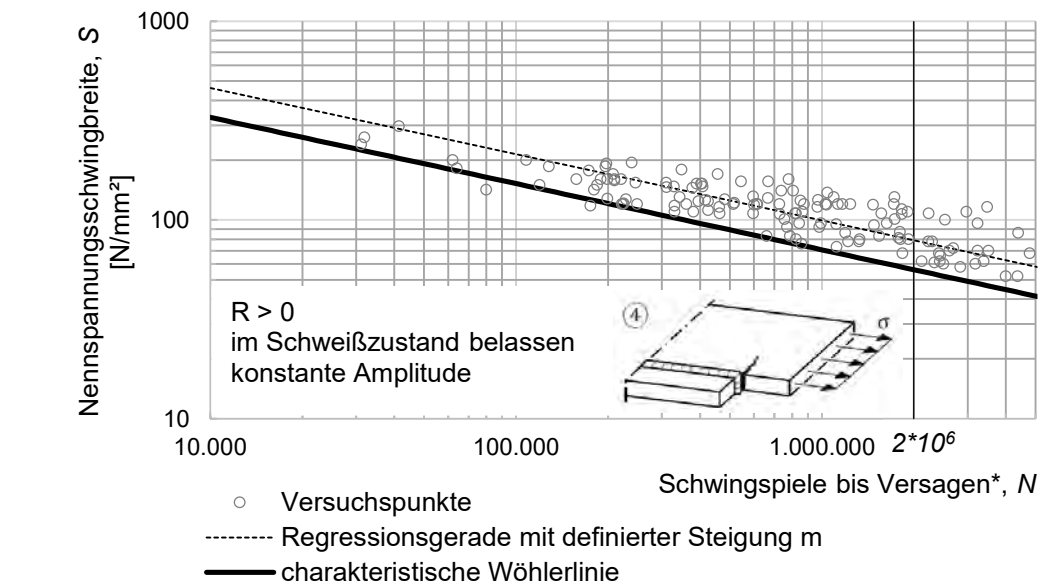
Figure 6-93: Fatigue crack on weld toe gusset plate: example for specimens geometry (a) picture of failures (b - d) [81] [82] [83]

6.4.5.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

Die statistische Auswertung an den gefilterten Versuchsdaten ergibt Kerbfall 58, vgl. Bild 6-83. Die experimentellen Untersuchungen umfassen auch Versuche, bei denen die Steifendicke dünner ist als die Flanschdicke, vgl. Bild 6-93 (b).

Sowohl die Regressionsgerade als auch die charakteristische Wöhlerlinie liegen signifikant tiefer als für das Konstruktionsdetail mit einer Längssteife die senkrecht auf der Walzebene des Grundblechs steht. Trotzdem liegt der aus den Versuchen ermittelte Kerbfall deutlich über Kerbfall 40 aus dem entsprechenden Kerbdetail in DIN EN 1993-1-9 [1].



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 56 [N/mm²]

Bild 6-94: Kerbfalleableitung Längssteife am Bauteilrand anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #18, #102, #116, #141, #162, #163, #164, #170)

Figure 6-94: Fatigue classification of gusset plates

6.4.5.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

Ein Vergleich der mittleren Wöhlerlinie mit der Gurney / Maddox Datensammlung von 1973 [69] zeigt, dass die ermittelten Wöhlerlinien ähnlich sind, vgl. Bild 6-95. Lediglich die Wöhlerlinienneigungen unterscheiden sich relativ deutlich.

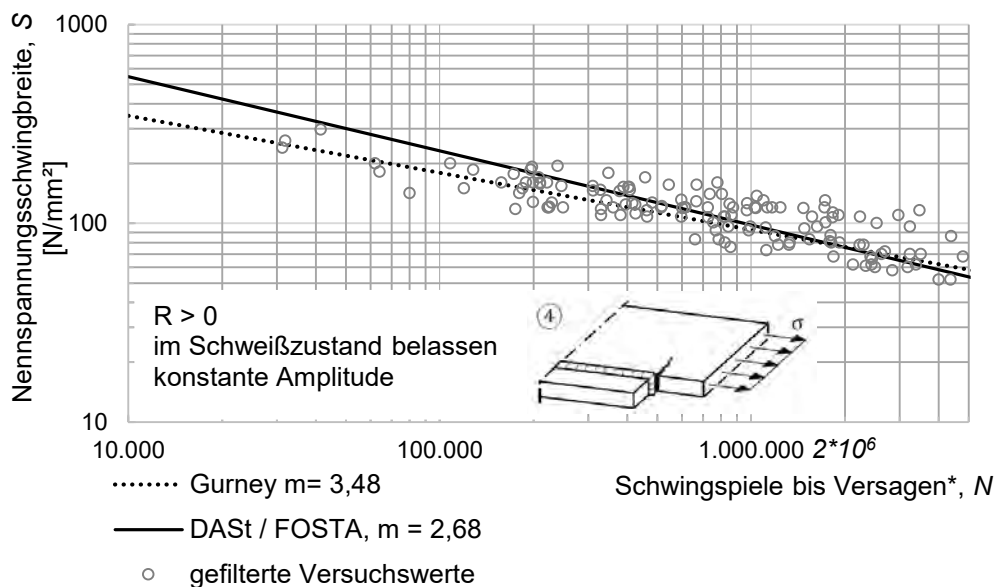


Bild 6-95: Vergleich mittlerer Wöhlerlinien mit [69]

Figure 6-95: Comparison of mean S-N curves with [69]

Neben dem Kerbfallkatalog in DIN EN 1993-1-9 [1] wird das Konstruktionsdetail auch im Kerbfallkatalog des IIW [16] aufgelistet. Die IIW-Empfehlungen empfehlen eine Ermüdungsfestigkeit in Abhängigkeit der Längssteifenlänge zwischen Kerbfall 40 und Kerbfall 50. Die für die Kerbfallableitung herangezogenen Versuchswerte in der DAST/FOSTA Datenbank weisen Steifenlängen von 80 bis 200 mm auf.

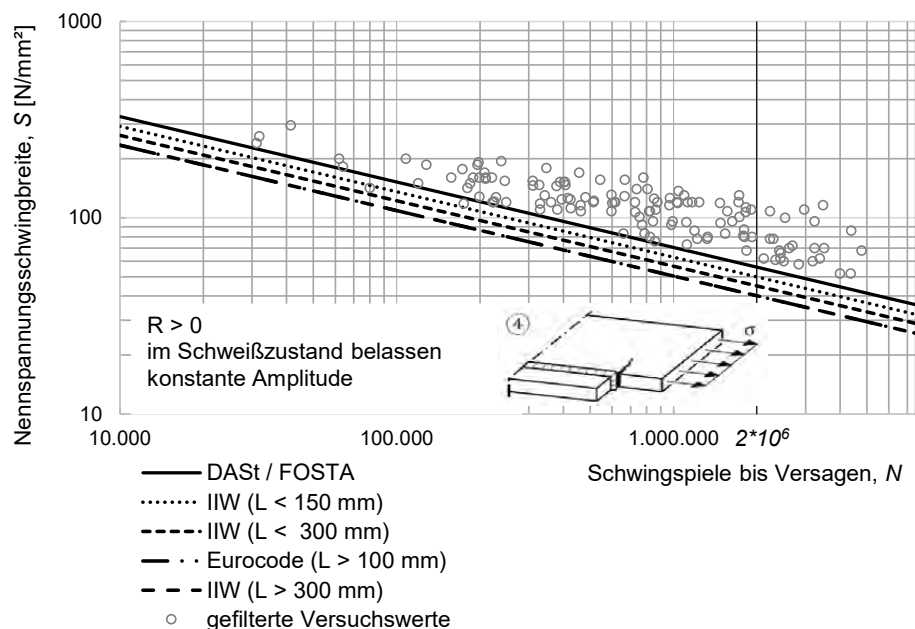


Bild 6-96: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „Längssteife am Bauteilrand“ mit der DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIW-Empfehlungen [16]

Figure 6-96: Comparison of characteristic S-N curves for “Gusset plates” with DIN EN 1993-1-9 [1] and IIW recommendations [16]

6.4.6 Längssteife am Bauteilrand mit Radius und kerbfrei bearbeitetem Schweißnahtübergang

Gusset plate with radius and smooth transition

6.4.6.1 Übersicht

Overview

Das Konstruktionsdetail beschreibt eine Längssteife am Bauteilrand, die in Lastrichtung einen Übergangsradius aufweist und deren Schweißnahtübergang in Lastrichtung kerbfrei bearbeitet wurde. Die DIN EN 1993-1-9 [1] unterteilt den Kerbfall dabei sehr deutlich im Hinblick auf den Kerbradius. Große Kerbradien erreichen Kerbfall 90, während kleine Kerbradien mit Kerbfall 50 bewertet sind. Bemerkenswert ist, dass die Spreizung der Kerbfälle größer ist als bei der Längssteife, vgl. Kapitel 6.4.2 und 6.4.4.

Der Eurocode schreibt nicht vor, wie das Detail an den Flanschrand zu schweißen ist. In den bekannten experimentellen Untersuchungen wurde die Längssteife jedoch mit einer versenkten Vollnaht an das Grundblech angeschlossen. Das Konstruktionsdetail nach Eurocode ist in Bild 6-72 dargestellt.

Tabelle 6-57: Längssteife am Bauteilrand mit Radius und geschliffenem Kerbübergang: Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Table 6-57: Longitudinal attachment with radius transition and smooth transition with fatigue class classification according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
<p>90</p> <p>$(r/L \geq 1/3;$ $r > 150 \text{ mm})$</p> <p>oder</p> <p>71</p> <p>$(\frac{1}{6} \leq \frac{r}{L} \leq \frac{1}{3})$</p> <p>oder</p> <p>50</p> <p>$(\frac{r}{L} < \frac{1}{6})$</p>		<p>4) An den Blech- oder Trägerflansch angeschweißtes Knotenblech</p>	<p>Am Knotenblech muss ein gleichmäßiger Übergang hergestellt werden, und zwar vor dem Schweißen mit dem Radius r durch maschinelle Bearbeitung oder Brennschneiden und nach dem Schweißen durch Schleifen der Schweißzone parallel zur Lastrichtung, so dass der Schweißnahtübergang der Quernaht vollständig entfernt ist.</p>

Der Hintergrund der Kerbfalleinstufung ist in [65] erläutert. Darin wird beschrieben, dass aufgrund fehlender experimenteller Untersuchungen zum Konstruktionsdetail die Kerbfallbestimmung mithilfe der Bruchmechanik erfolgt ist, vgl. Bild 6-78. Dargestellt sind Ergebnisse aus einem bruchmechanischen Modell sowie vergleichende experimentelle Versuchsergebnisse von Puchner [84] die mit Kerbfall 92 (Kleinversuche) bzw. 103 (Bauteilversuche) dargestellt werden. Eine Neuauswertung der Puchner Ergebnisse im Rahmen dieser Forschungsstudie kommt zu deutlich niedrigeren Ermüdungsfestigkeiten. Die Kleinversuche liegen demzufolge bei Kerbfall 60, die Bauteilversuche bei Kerbfall 71.

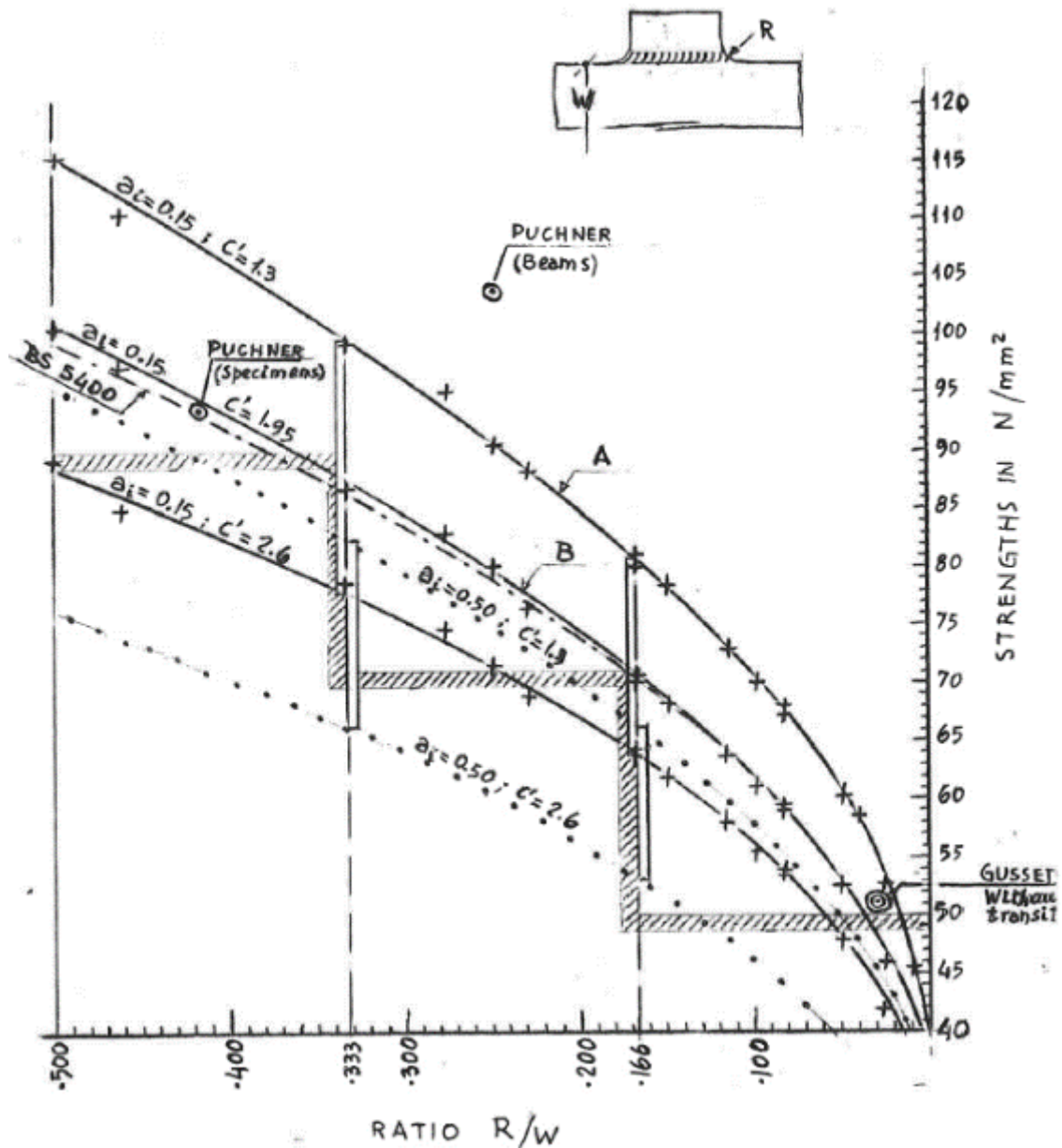


Bild 6-97: Hintergrund zur Kerbfallableitung zum Konstruktionsdetail Längssteife am Bauteilrand mit Radius und kerbfrei bearbeitet [65]

Figure 6-97: Background fatigue classification gusset plate with radius and smooth transition [65]

Eine experimentelle Grundlage, die eine Abstufung nach den Radien zulässt, ist nicht bekannt. Auch der hohe Kerbfall 90 lässt sich mit den vorliegenden experimentellen Daten, insbesondere unter Berücksichtigung der experimentellen Daten von Puchner [84], nicht bestätigen.

6.4.6.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Konstruktionsdetail sind nur wenige experimentelle Untersuchungen bekannt, vgl. Tabelle 6-58.

Tabelle 6-58: Übersicht Datengrundlage: Längssteife am Bauteilrand mit Radius und geschliffenem Kerbübergang

Table 6-58: Overview Database: Gusset plate with radius and smooth transition

Wöhlerversuche insgesamt	45
Anzahl Quellen	3
Anzahl Serien	7

Eine Übersicht aller Versuchsergebnisse zur Längssteife am Bauteilrand in der DAST/FOSTA Datenbank ist in Bild 6-98 gegeben.

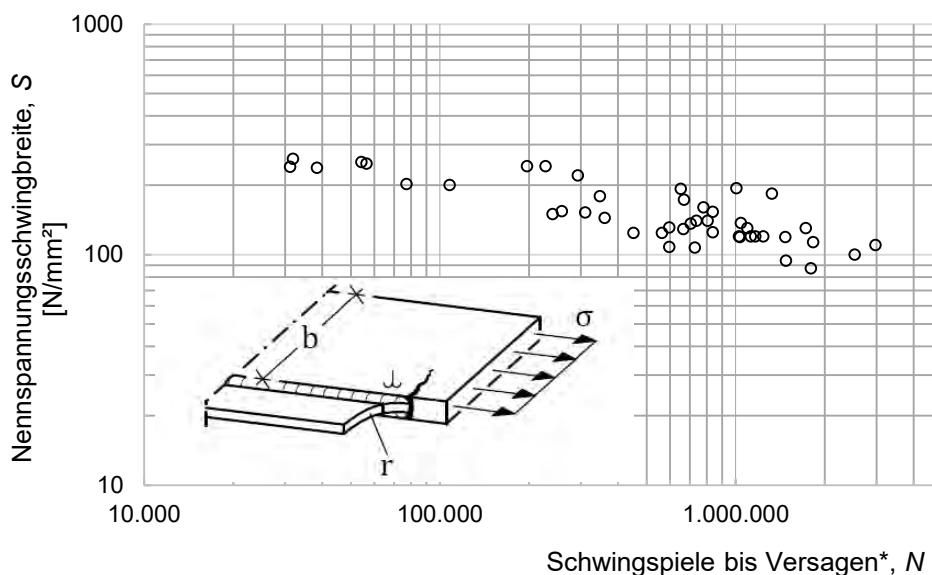


Bild 6-98: Darstellung aller bekannten Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail: „Längssteife am Bauteilrand mit Radius und geschliffenem Kerbübergang“ (Quellen IDs: #12, #102 (auch in #117), #162)

Figure 6-98: Figure of experimental fatigue test data for detail: “Gusset plate with radius and smooth transition”

6.4.6.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Der Ermüdungsanriss für das im Schweißzustand belassene Konstruktionsdetail entsteht in der Regel am Ende der Längssteife am Schweißnahtübergang, siehe Bild 6-99.

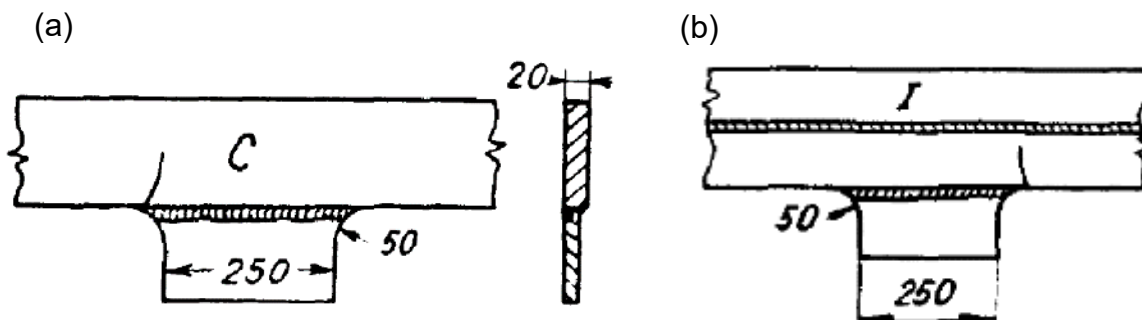


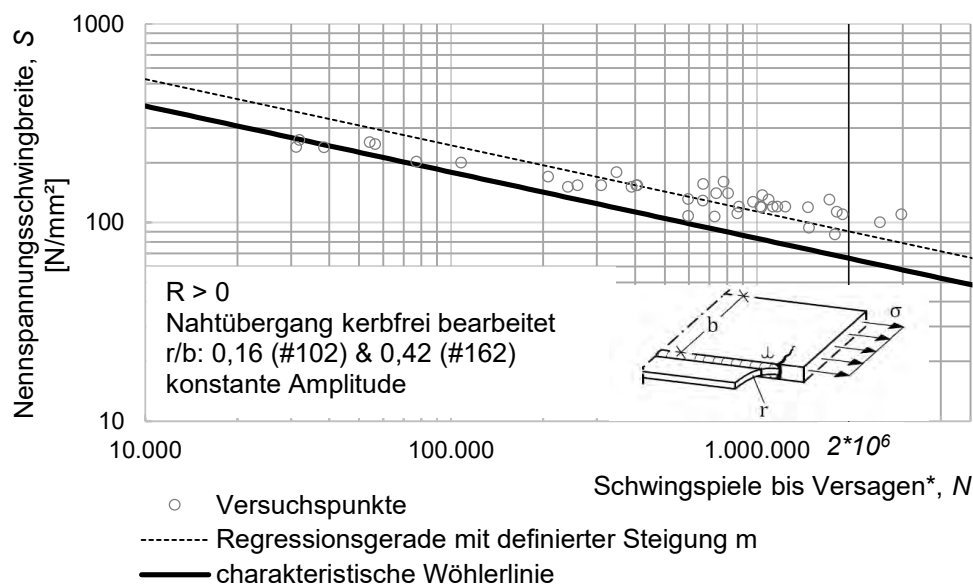
Bild 6-99: Ermüdungsriss am Nahtübergang Längssteife am Bauteilrand mit Radius und kerbfrei bearbeitet (a) Kleinversuch (b) Trägerversuch [84]

Figure 6-99: Fatigue crack on weld toe gusset plate with radius and smooth transition (a) small scale specimens (b) girder specimens [84]

6.4.6.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

Nur zwei der drei Quellen sind als Primärquellen zu bewerten. Da in den experimentellen Daten kein signifikanter Unterschied in den Versuchsergebnissen der beiden Quellen festgestellt werden kann, erfolgt die statistische Auswertung für beide Quellen gemeinsam und ergibt Kerbfall 66.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 66 [N/mm²]

Bild 6-100: Kerbfallableitung Längssteife am Bauteilrand mit Radius und kerbfrei bearbeitet anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #102, (auch in #117), #162)

Figure 6-100: Fatigue classification of gusset plate with radius and smooth transition

6.4.6.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

Es sind keine Datensammlungen zu dem Konstruktionsdetail bekannt. Der Kerbfallkatalog des IIW [16] beinhaltet das Detail mit der gleichen Kerbfalleinstufung wie DIN EN 1993-1-9 [1]. Ein Vergleich der Kerbfalleinstufungen mit den experimentellen Daten ist in Bild

6-101 dargestellt.

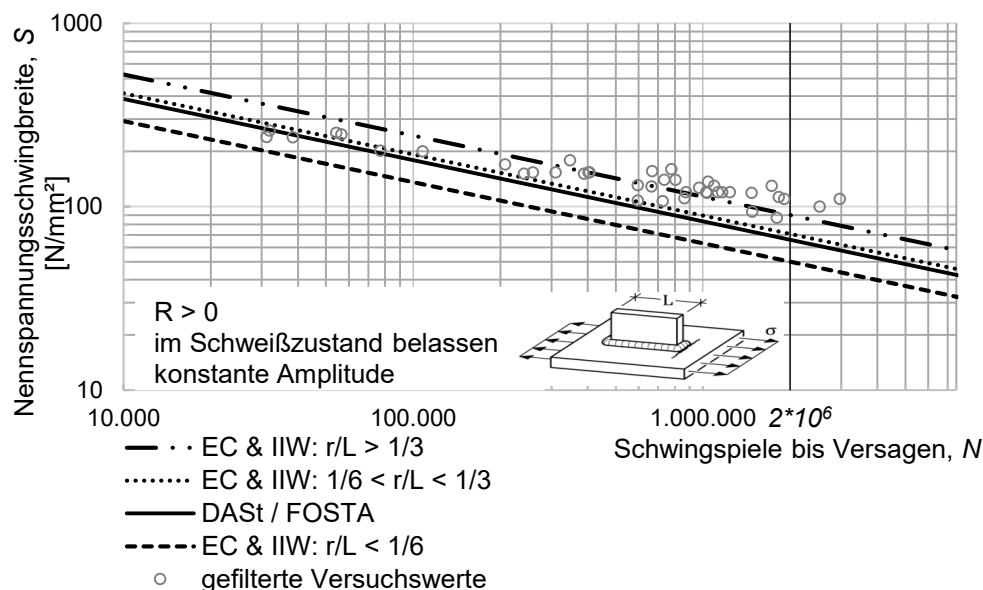


Bild 6-101: Vergleich der charakteristischen Wöhlerlinien des Details „Längssteife am Bauteilrand mit Radius und kerbfrei bearbeitet“ mit der DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIW-Empfehlungen [16]

Figure 6-101: Comparison of characteristic S-N curves for “Gusset plates with radius and smooth transition” with DIN EN 1993-1-9 [1] and IIW recommendations [16]

Die Spreizung zwischen den Kerbfalleinstufungen im Eurocode bzw. IIW-Empfehlungen erscheint zu hoch. Die zugrundeliegende Datenbasis zeigt keine Anzeichen einer signifikanten Abhängigkeit vom Übergangsradius, ist jedoch aufgrund des geringen Umfangs nur begrenzt aussagekräftig.

6.4.7 Quersteife auf Blechen

Transverse attachment welded to plate

6.4.7.1 Übersicht

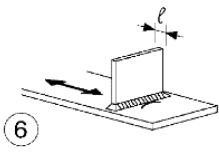
Overview

DIN EN 1993-1-9 [1] unterteilt das Konstruktionsdetail Quersteife in drei Unterdetails: Quersteife auf Blechen, Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Biegeträgern und am Steg oder Flansch angeschweißte Querschotte in Kastenträgern. Für alle Details gelten die gleichen Anforderungen und Ermüdungsfestigkeiten.

In Tabelle 6-59 ist die aktuelle Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1] dargestellt.

Tabelle 6-59: Quersteife auf Blechen: Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Table 6-59: Transverse attachment welded to plate: fatigue class classification according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
<p>80 für $l \leq 50$ oder 71 für $50 < l \leq 80$</p>		<p>6) Quersteife auf Blechen</p>	<p>Die Schweißnahtenden sind sorgfältig zu schleifen, um Einbrandkerben zu entfernen</p>

Der Kerbfall ist abhängig vom geometrischen Parameter l , der den Abstand zwischen den beiden Schweißnahtübergängen beschreibt.

Das Konstruktionsdetail ist eines der am meisten untersuchten Ermüdungsdetails in der Datenbank. Eine sehr umfangreiche Studie zum Konstruktionsdetail ist in [34] gegeben. Darin wird anhand experimenteller und numerischer Untersuchungen der Einfluss des Parameters l hergeleitet, der für die Kerbfalleinstufung des Eurocodes übernommen wurde.

6.4.7.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Die zur Verfügung stehenden experimentellen Versuchsergebnisse zur Quersteife auf Blechen sind sehr umfangreich, vgl. Tabelle 6-60.

Tabelle 6-60: Übersicht Datengrundlage: Konstruktionsdetail Längssteife am Bauteilrand

Table 6-60: Overview Database: Fatigue detail gusset plate

Wöhlerversuche insgesamt	3397
Anzahl Quellen	41
Anzahl Serien	206

Eine Übersicht aller Versuchsergebnisse zur Quersteife auf Blechen in der DAST/FOSTA Datenbank ist in Bild 6-102 gegeben.

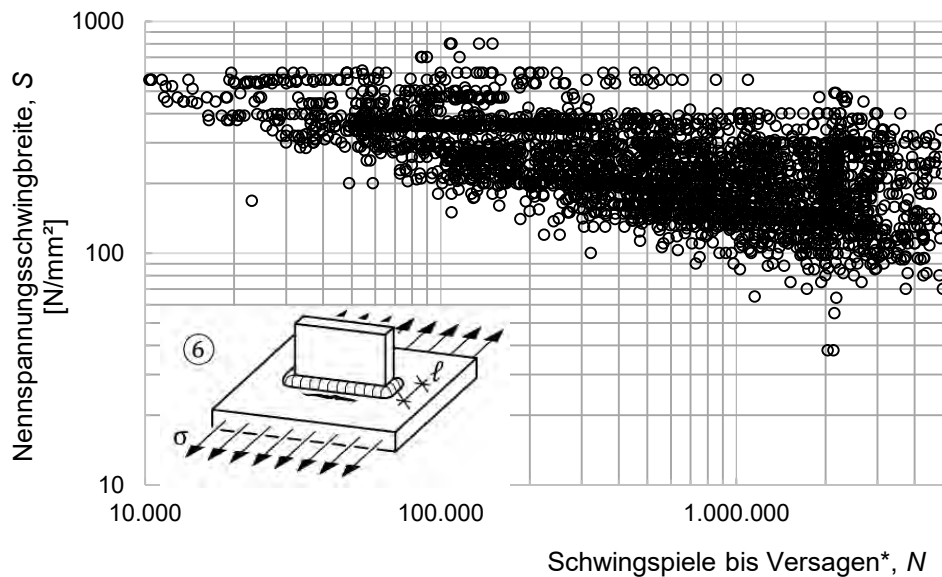


Bild 6-102: Darstellung aller bekannten Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail: „Quersteife auf Blechen“ (Quellen IDs: #319, #1030, #1029, #316, #313, #314, #315, #188, #187, #186, #185, #110, #184, #102, #182, #183, #181, #175, #193, #192, #191, #189, #81, #171, #47, #18, #172, #76, #61, #147, #143, #173, #176, #96, #177, #103, #100, #178, #179, #180)

Figure 6-102: Figure of experimental fatigue test data for detail: “Transverse attachment welded to plate”

Das Streufeld der Daten in Bild 6-102 ist deutlich breiter als beispielsweise das der Längssteife, vgl. Bild 6-81.

6.4.7.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Die Quersteife versagt in der Regel am Schweißnahtübergang.

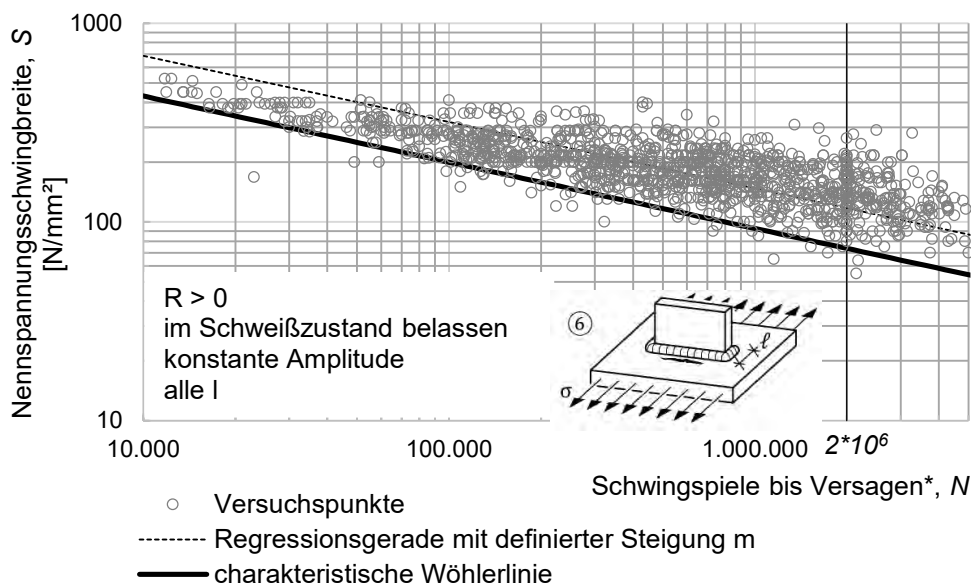
6.4.7.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

Im Folgenden werden mehrere Kerbfallableitungen für das Konstruktionsdetail Quersteife auf Blechen vorgestellt.

Kerbfallableitung an ausgewählten Daten ohne Berücksichtigung von l

In Bild 6-103 ist eine Kerbfallableitung ohne Berücksichtigung des Parameters l dargestellt. In einigen Primärquellen wird der Parameter l nicht dokumentiert. In Bild 6-103 werden diese Untersuchungen berücksichtigt. In den folgenden Darstellungen mit Unterteilungen hinsichtlich des Parameters l können diese experimentellen Daten jedoch nicht berücksichtigt werden.



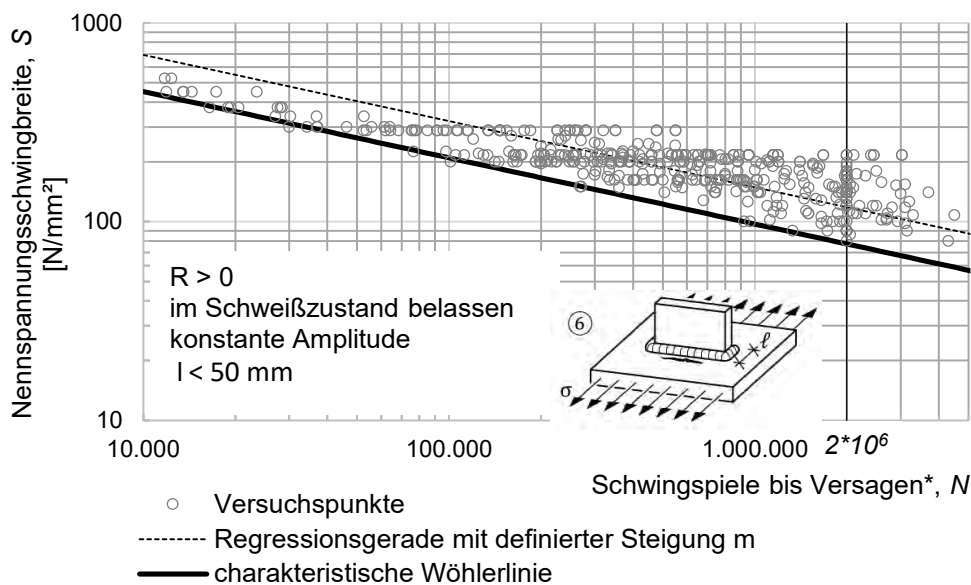
Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 74 [N/mm²]

Bild 6-103: Kerbfallableitung „Quersteife auf Blech“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #319, #1030, #1029, #316, #313, #314, #315, #188, #187, #186, #185, #110, #184, #102, #182, #175, #192, #191, #189, #81, #171, #172, #76, #147, #143, #173, #100, #178)

Figure 6-103: Fatigue classification of transverse attachment welded to plate

Kerbfallableitung an ausgewählten Daten $l < 50$ mm

Für die Kerbfallableitung in Bild 6-104 wurden alle Versuchsdaten herangezogen, für die der Parameter l mit weniger als 50 mm dokumentiert ist.



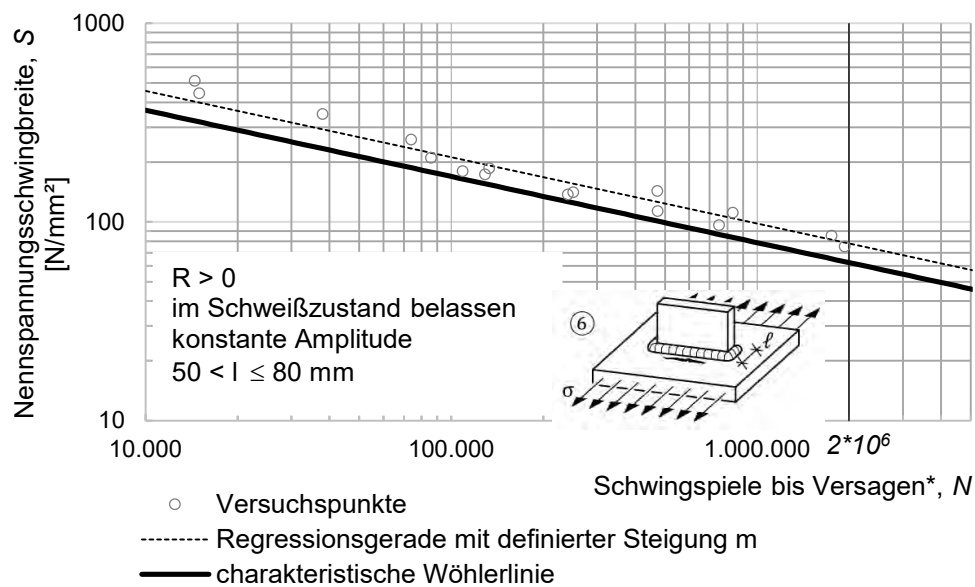
Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 77 [N/mm²]

Bild 6-104: Kerbfallableitung „Quersteife auf Blech“ mit $l < 50$ mm, anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #319, #1030, #316, #102, #189)

Figure 6-104: Fatigue classification of transverse attachment welded to plate with $l < 50$ mm

Kerbfallableitung an ausgewählten Daten $50 < l \leq 80$ mm

Die Kerbfallableitung für alle Versuchsdaten mit $50 < l \leq 80$ mm ist in Bild 6-105 dargestellt.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 56 [N/mm²]

Bild 6-105: Kerbfallableitung „Quersteife auf Blech“ mit $l \geq 50$ mm, anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #316)

Figure 6-105: Fatigue classification of transverse attachment welded to plate with $l \geq 50$ mm

Experimentelle Versuchsdaten an Quersteifen mit einem Parameter l zwischen 50 mm und 80 mm sind nur aus [35] (Quelle #316) bekannt. In [34] sind zusätzliche Versuche mit $l > 80$ mm dokumentiert.

Eine genaue Untersuchung zum Einfluss des Parameters l ist in Kapitel 9.2.5.1 gegeben. Die bekannten Versuchsergebnisse weisen darauf hin, dass der Abstand zwischen den Schweißnahtübergängen den Kerbfall signifikant beeinflusst.

6.4.7.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

Der Vergleich der Datensammlungen erfolgt für die Daten mit $l < 50$ mm.

Sowohl der DVS Wöhlerlinienkatalog für Längssteifen [79], als auch die Gurney Datensammlung aus [69] von 1973, enthalten ausschließlich experimentelle Untersuchungen für die diese Einschränkung zutrifft.

Die DAST/FOSTA Datensammlung beinhaltet alle Quellen aus [69] und [79], die jedoch aufgrund der Filterkriterien nur teilweise für die Kerbfallauswertung herangezogen wurden. Ein Vergleich der mittleren Wöhlerlinien für das Konstruktionsdetail Quersteife auf Blechen ist in Bild 6-106 gegeben.

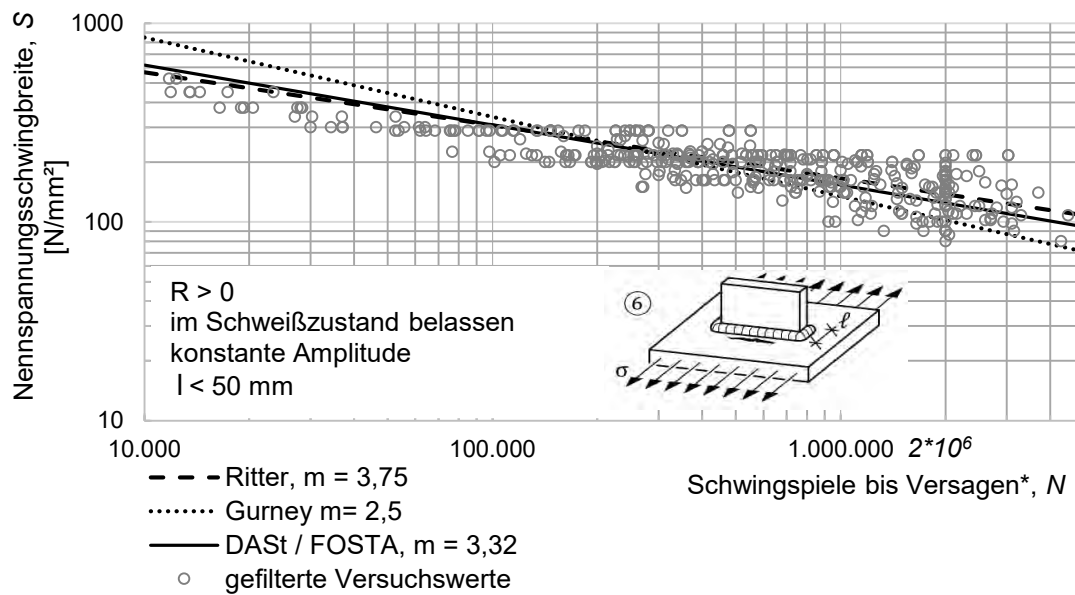


Bild 6-106: Vergleich mittlerer Wöhlerlinien des Details „Quersteife auf Blechen“ mit [69] und [79]

Figure 6-106: Comparison of mean S-N curves of detail „transverse attachment welded to plate“ with [69] and [79]

Die mittlere Wöhlerlinie der unterschiedlichen Datensammlungen liefern ähnliche mittlere Wöhlerlinien. Die größte Abweichung zeigt die ermittelte freie Wöhlerlinienneigung von Gurney [69]. Ursache dafür ist möglicherweise eine Korrektur der Wöhlerlinienneigung durch ein Modell zur Berücksichtigung von Eigenspannungen, die nach [69] das Fehlen von Eigenspannungen in Kleinversuchen berücksichtigen soll. Die ursprüngliche Neigung in [69] ist steiler und damit näher an der mittleren Wöhlerlinie aus der DAST/FOSTA Datenbank.

In Bild 6-107 ist die charakteristische Wöhlerlinie der Quersteife auf Blechen im Vergleich zu den Bemessungswöhlerlinien aus den IIW-Empfehlungen [16] und der DIN EN 1993-1-9 [1] dargestellt.

Die charakteristischen Wöhlerlinien aus allen Werken sind sehr ähnlich und passen sehr gut zur experimentellen Datengrundlage.

Auf einen Kerbfallvergleich für $l > 50 \text{ mm}$ wird aufgrund der lückenhaften Datengrundlage verzichtet.

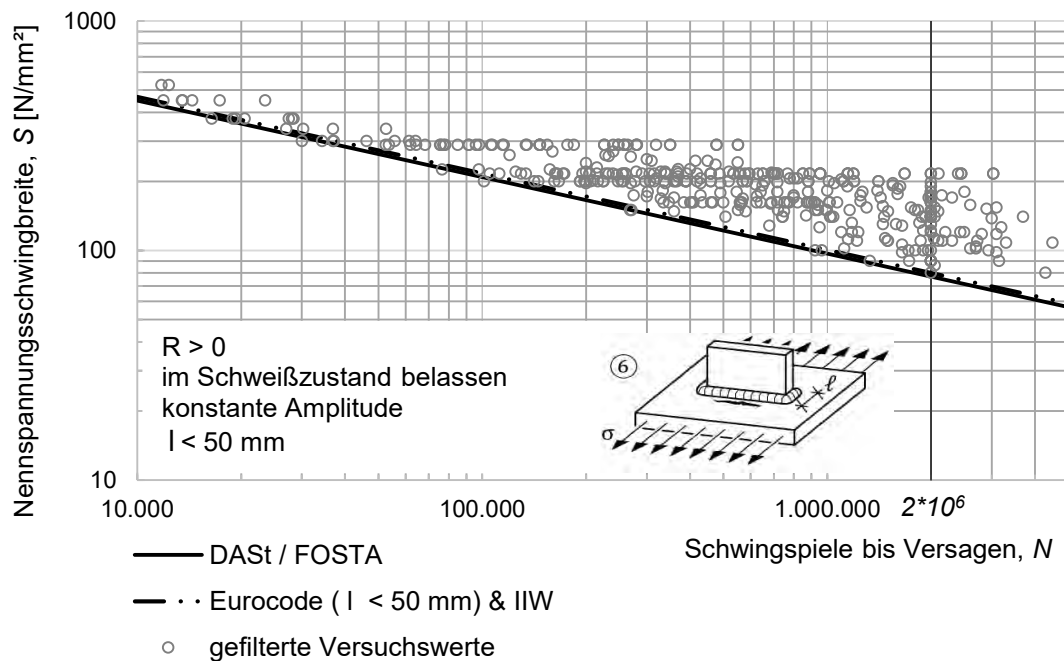


Bild 6-107: Vergleich charakteristischer Wöhlerlinien des Details „Quersteife auf Blechen“ mit [1] und [16]

Figure 6-107: Comparison of characteristic S-N curves of detail „transverse attachment welded to plate“ with [1] and [16]

6.4.8 Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Trägern

Vertical stiffener welded to a beam or plate girder

6.4.8.1 Übersicht

Overview

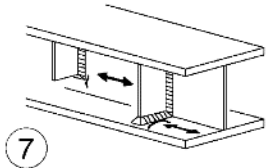
Das Detail ist eng verwandt mit dem Konstruktionsdetail „Quersteife auf Blechen“. Durch das Einpassen der Vertikalsteife in ein Trägerprofil ergeben sich unter Umständen kompliziertere Anordnungen, wie beispielsweise Nahtkreuzungen an der Längsnaht bzw. des Ausrundungsradius des Trägers und der Schweißnaht der Quersteife.

Die Kerbfalleinstufung umfasst auch halbhohle Quersteifen. Die Ermittlung der einwirkenden Spannungsschwingbreite muss hier mithilfe von Hauptspannungen vorgenommen werden.

In DIN EN 1993-1-9 [1] werden alle Varianten zusammengefasst und mit dem gleichen Kerbfall wie für das Konstruktionsdetail „Quersteife auf Blechen“ bewertet, vgl. Tabelle 6-61.

Tabelle 6-61: Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Biegeträgern: Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Table 6-61: Vertical stiffeners welded to a beam or plate girder: fatigue class classification according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
<p>80 für $l \leq 50$ oder 71 für $50 < l \leq 80$</p>		<p>7) Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Blechträgern</p>	<p>Die Schweißnahtenden sind sorgfältig zu schleifen, um Einbrandkerben zu entfernen</p>

Der Kerbfall ist wie das Detail „Quersteife auf Blechen“ abhängig vom geometrischen Parameter l , der den Abstand zwischen den beiden Schweißnahtübergängen beschreibt.

6.4.8.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Die DAST/FOSTA Datenbank enthält ausschließlich Trägerversuche zu diesem Konstruktionsdetail. Wie im entsprechenden Kerbfall werden die Versuchsergebnisse für die Auswertung nicht unterteilt, d.h. halbhohe Vertikalsteifen, sowie Vertikalsteifen mit und ohne Aussparung werden zusammen ausgewertet. Eine Übersicht der zur Verfügung stehenden Versuche ist in Tabelle 6-62 gegeben.

Tabelle 6-62: Übersicht Datengrundlage: Konstruktionsdetail Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Trägern

Table 6-62: Overview Database: Fatigue detail Vertical stiffener welded to a beam or plate girder

Wöhlerversuche insgesamt	617
Anzahl Quellen	16
Anzahl Serien	62

Eine Übersicht aller Versuchsergebnisse zur Quersteife auf Blechen in der DAST/FOSTA Datenbank ist in Bild 6-108 gegeben.

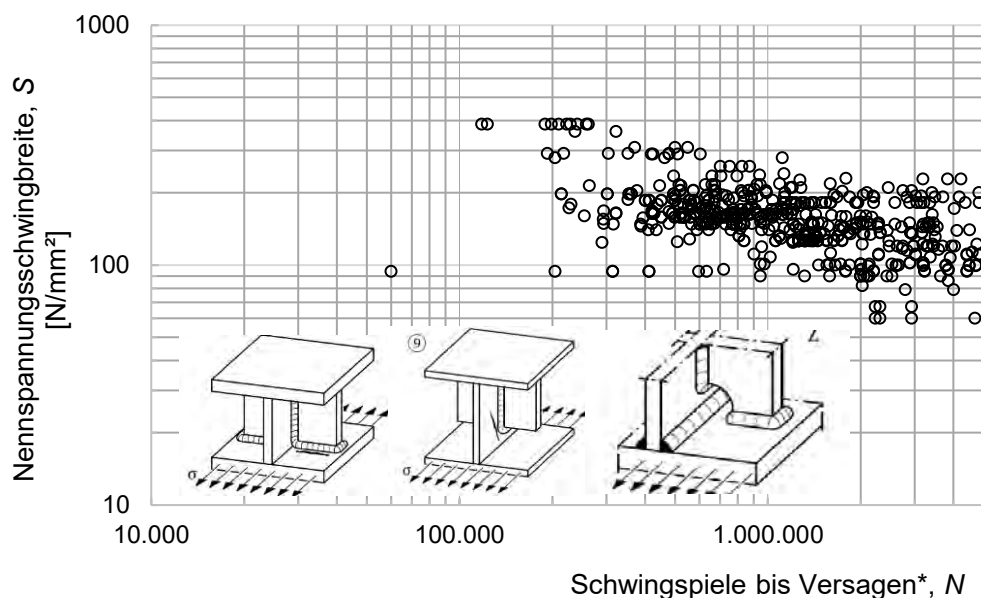


Bild 6-108: Darstellung aller bekannten Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail: Vertikalsteife in Walz- oder geschweißten Trägern (Quellen IDs: #1007, #29, #142, #162, #143, #198, #37, #200, #202, #38, #27, #204, #205, #207, #196)

Figure 6-108: Figure of experimental fatigue test data for detail: "Vertical stiffener welded to a beam or plate girder"

6.4.8.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Ermüdungsrisse an Vertikalsteifen von Trägerprofilen unter Momentenbeanspruchung können sowohl im Druck- als auch im Zugbereich auftreten. Die zum Versagen führenden Risse treten jedoch fast ausschließlich im Zugbereich auf. Bei halbhohen Quersteifen initiiert der maßgebende Riss in der Regel an der Umschweißung der Steife im Zugbereich. Der Riss tritt senkrecht zur maximalen Hauptspannung auf, vgl. Bild 6-109 (a). Bei Prüfkörpern mit Aussparung im Bereich der Trägerlängsnaht bzw. des Ausrundungsradius tritt der Ermüdungsrisse in der Regel direkt an der Aussparung auf. Rissausgangspunkt ist dabei in der Regel der Schweißnahtübergang am Flansch. Der Riss breitet sich bei fortschreitender Schwingbelastung sowohl im Flansch, als auch im Träger aus, vgl. Bild 6-109 (b). Bei Trägern ohne Aussparung tritt der zum Versagen führende Ermüdungsrisse in der Regel am Schweißnahtübergang der Schweißnaht zwischen Zugflansch und Steife, nahe der Längsnaht bzw. des Schweißnahtübergangs auf. Auch hier breitet sich der Ermüdungsrisse mit fortschreitender Schwingbelastung im Flansch und im Steg aus, vgl. Bild 6-109 (c) [73], [82], [83], [85].

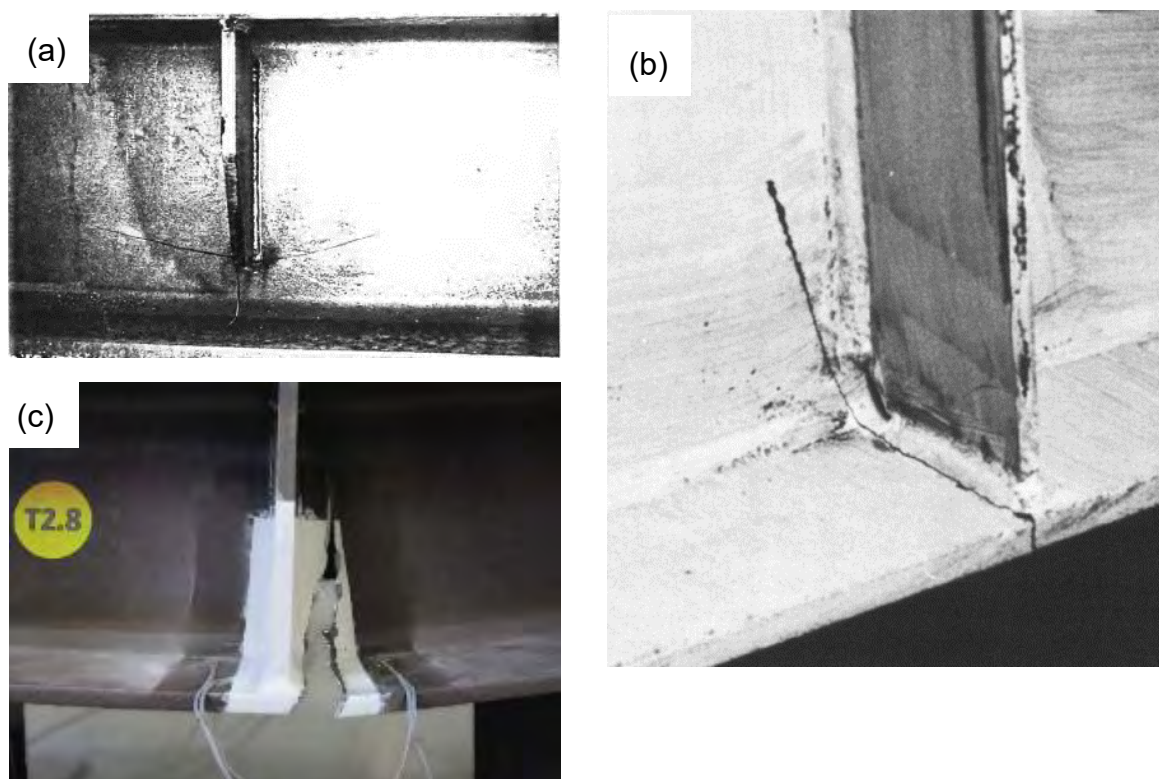


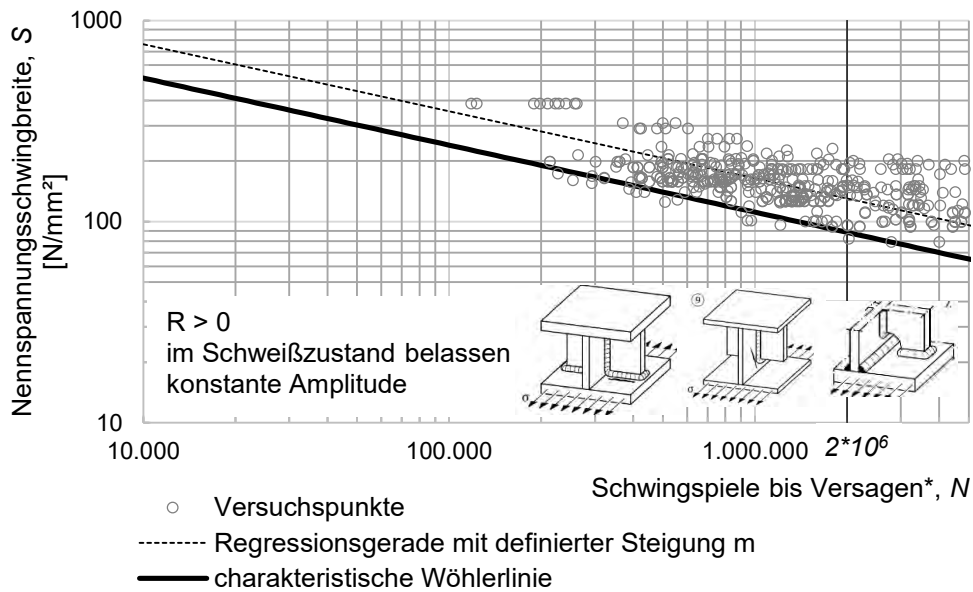
Bild 6-109: Ermüdungsriß an einer halbhohen Vertikalsteife (a) 51 [85]; Ermüdungsriß einer Vertikalsteife mit Aussparung im Bereich der Träger Längsnaht (b) 49 [83], Ermüdungsriß einer Vertikalsteife ohne Aussparung (c) [86]

Figure 6-109: Fatigue cracks on different types of vertical stiffeners [85], [83], [86]

6.4.8.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

Nach dem Filtern der Daten steht eine umfangreiche Versuchsbasis aus zehn unterschiedlichen Primärquellen zur Auswertung zur Verfügung. Für die folgende Auswertung wird, wie im entsprechenden Kerbdetail nach DIN EN 1993-1-9 [1], keine Unterteilung hinsichtlich der Ausbildung der Vertikalsteife vorgenommen. Das heißt Vertikalsteifen mit und ohne Aussparung, sowie halbhohle Vertikalsteifen, werden zusammen ausgewertet. Für die halbhohen Vertikalsteifen wird die maximale Hauptspannung am Ende der Steife im Zugbereich bewertet. Für die an den Zuggurt angeschlossenen Steifen werden die aus dem Moment resultierenden Biegezugspannungen als Nennspannung angesetzt. Die resultierende mittlere und charakteristische Wöhlerlinie ist in Bild 6-110 dargestellt.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 88 [N/mm²]

Bild 6-110: Kerbfalleableitung: Vertikalsteife in Walz- oder geschweißten Trägern (Quellen IDs: #1007, #29, #142, #162, #143, #198, #37, #202, #38, #196)

Figure 6-110: Fatigue classification of vertical stiffener welded to a beam or plate girder

Im direkten Vergleich der verfügbaren experimentellen Daten zum Konstruktionsdetail „Quersteife auf Blechen“ mit der „Vertikalsteife in Walz- oder geschweißten Trägern“ wird deutlich, dass letzteres Detail im Schnitt etwas höhere Ermüdungsfestigkeiten aufweist.

6.4.8.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

In Bild 6-111 ist die mittlere Wöhlerlinie aus dem Wöhlerlinienkatalog des DVS für Quersteifen [87] mit der aus den experimentellen Daten ermittelten mittleren Wöhlerlinie der DAST/FOSTA Datenbank dargestellt.

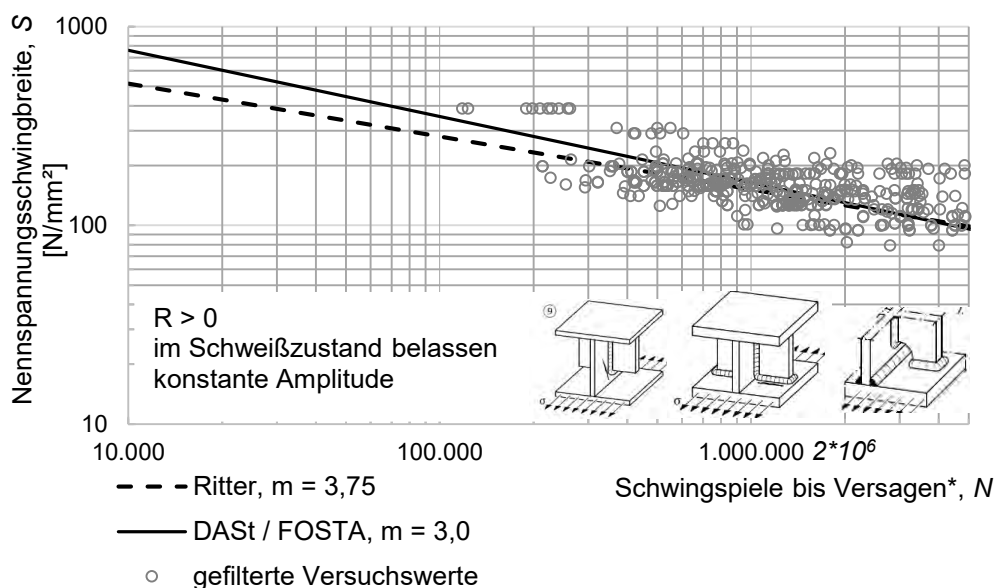


Bild 6-111: Vergleich mittlerer Wöhlerlinien des Details „Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Profilen“ mit [87]

Figure 6-111: Comparison of mean S-N curves of detail of detail „ Vertical stiffener welded to a beam or plate girder“ with [87]

Die aus den experimentellen Daten berechnete Wöhlerlinienneigung liefert aufgrund des breiten Streufelds keinen sinnvollen Wert und wird daher mit $m = 3$ vordefiniert. Die Wöhlerlinienneigung in [87] ($m = 3,75$) wurde ebenfalls nicht aus den Versuchen abgeleitet. Trotzdem wird deutlich, dass beide Auswertungen zu sehr ähnlichen Ergebnissen kommen.

Ein Vergleich charakteristischer Wöhlerlinien entfällt, da sowohl DIN EN 1993-1-9 [1] als auch die Kerbfallempfehlungen des IIW identisch zum Konstruktionsdetail „Quersteife auf Blechen“ sind, vgl. Bild 6-107.

6.4.9 Geschweißte Kopfbolzendübel und Schweißbuchsen

Welded shear studs

6.4.9.1 Übersicht

Overview

Das Detail beschreibt Dübel, die auf eine schwingend beanspruchte Konstruktion geschweißt werden. Das Detail kommt insbesondere als schubsteifes Verbindungsmittel in Verbundträgern zum Einsatz. Auch Schweißbutzen, die beispielsweise in Windenergieanlagen zur Befestigung von Anbauteilen zum Einsatz kommen, werden mithilfe dieses Kerbdetails bemessen. DIN EN 1993-1-9 [1] nimmt keine Unterteilung hinsichtlich des Schweißprozesses vor und das Detail gilt auch für Schweißverfahren mit Hubzündung. In Bild 6-78 ist das Konstruktionsdetail entsprechend DIN EN 1993-1-9 [1] dargestellt.

Tabelle 6-63: Kopfbolzendübel nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Table 6-63: Welded shear studs according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
80		9) Einfluss geschweißter Kopfbolzendübel auf den Grundwerkstoff	/

6.4.9.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Eine Übersicht der zur Verfügung stehenden Versuche ist in Bild 6-64 gegeben.

Tabelle 6-64: Übersicht Datengrundlage: Konstruktionsdetail Längssteife am Bauteilrand

Table 6-64: Overview Database: Fatigue detail gusset plate

Wöhlerversuche insgesamt	477
Anzahl Quellen	8
Anzahl Serien	56

Eine Übersicht aller Versuchsergebnisse zum geschweißten Kopfbolzendübel in der DAST/FOSTA Datenbank ist in Bild 6-112 gegeben.

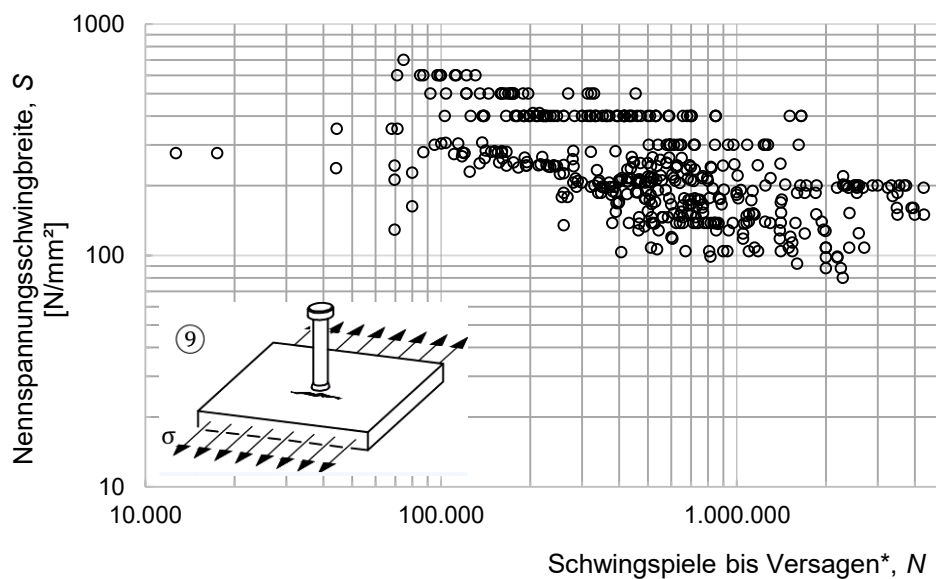


Bild 6-112: Darstellung aller bekannten Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail: geschweißter Kopfbolzendübel (Quellen IDs: #318, #12, #209, #210, #211, #212, #213, #214)

Figure 6-112: Figure of experimental fatigue test data for detail: “Welded shear studs”

6.4.9.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Alle dokumentierten Ermüdungsrisse, inklusive der hubbolzengeschweißten Dübel, versagen ausgehend vom Schweißnahtübergang der Schweißwulst bzw. der umlaufenden Kehlnaht, vgl. Bild 6-113.

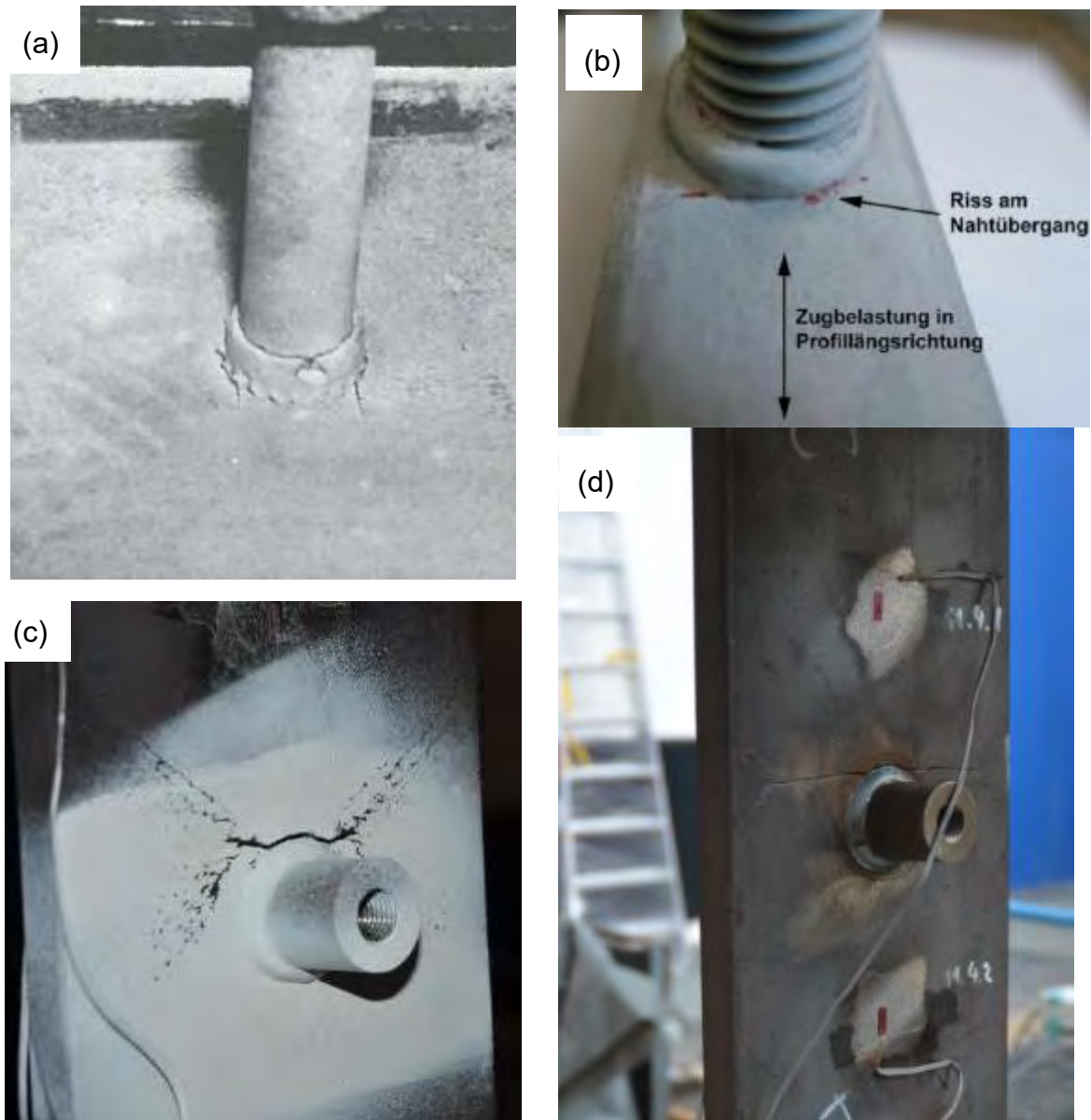


Bild 6-113: Ermüdungsrisse am Nahtübergang der Schweißwulst von bolzenschweißten Kopfbolzendübeln (a) [88] und Gewindebolzen (b) [89], Ermüdungsrisse am Nahtübergang von Butzen mit umlaufender Kehlnaht (c) und (d) [90]

Figure 6-113: Fatigue cracks on weld toe of bolt welded shear studs (a) [88] and (b) [89] and fatigue cracks on weld toe of bushings welded around [90]

In [89] wurde festgestellt, dass Faktoren wie Schweißposition, Schweißparameter und Spannungsarmglühen keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit ausüben.

6.4.9.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Daten

Fatigue class derivation by selected data

Für die Kerbfallableitung werden bolzenschweißte Kopfbolzendübel, Gewindebolzen und Butzen mit umlaufender Kehlnaht gemeinsam bewertet.

Für die zur Auswertung herangezogenen Versuche wurden ausschließlich die Grundbleche schwingend belastet. Versuche mit direkter Beanspruchung des Aufschweißteils wurden nicht berücksichtigt. Die mittlere sowie charakteristische Wöhlerlinie für das Detail ist in Bild 6-114 dargestellt.

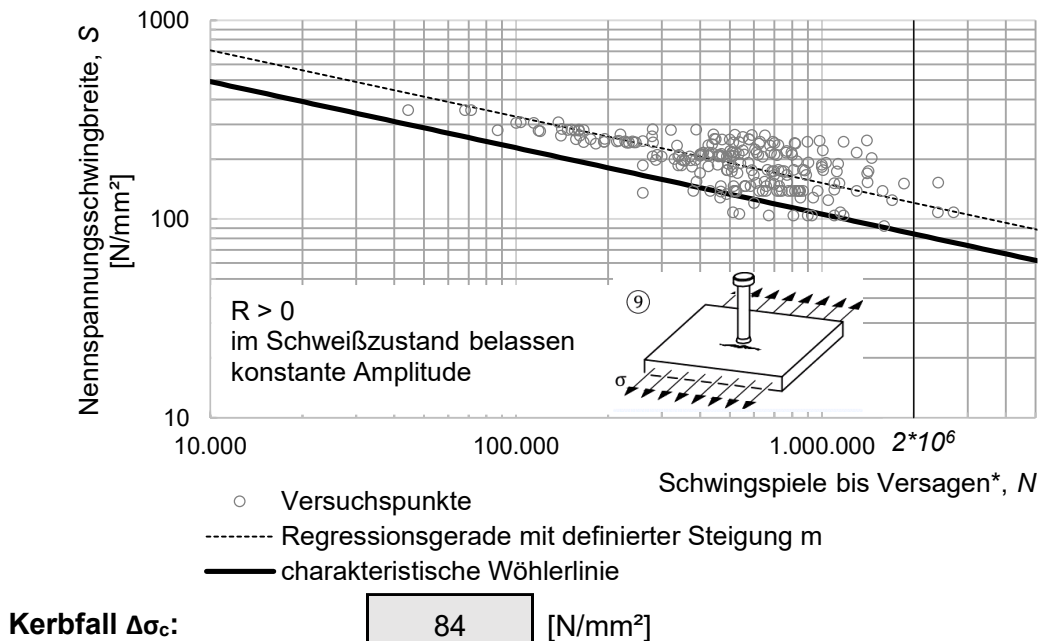


Bild 6-114: Kerbfallableitung: Kopfbolzendübel (Quellen IDs: #209, #213, #214, #318)

Figure 6-114: Fatigue classification of welded studs

6.4.9.5 Vergleich mit anderen Datensammlungen

Comparison with other databases

In Bild 6-115 ist die aus den Versuchen ermittelte charakteristische Wöhlerlinie im Vergleich zu den Bemessungswöhlerlinien aus den IIW-Empfehlungen [16] und der EN1993-1-9 [1] dargestellt. In den IIW-Empfehlungen werden Bolzen wie Aufschweißteile mit kleinem Durchmesser (<50 mm) behandelt. Sowohl Eurocode als auch IIW-Empfehlungen bewerten das Konstruktionsdetail mit Kerbfall 80.

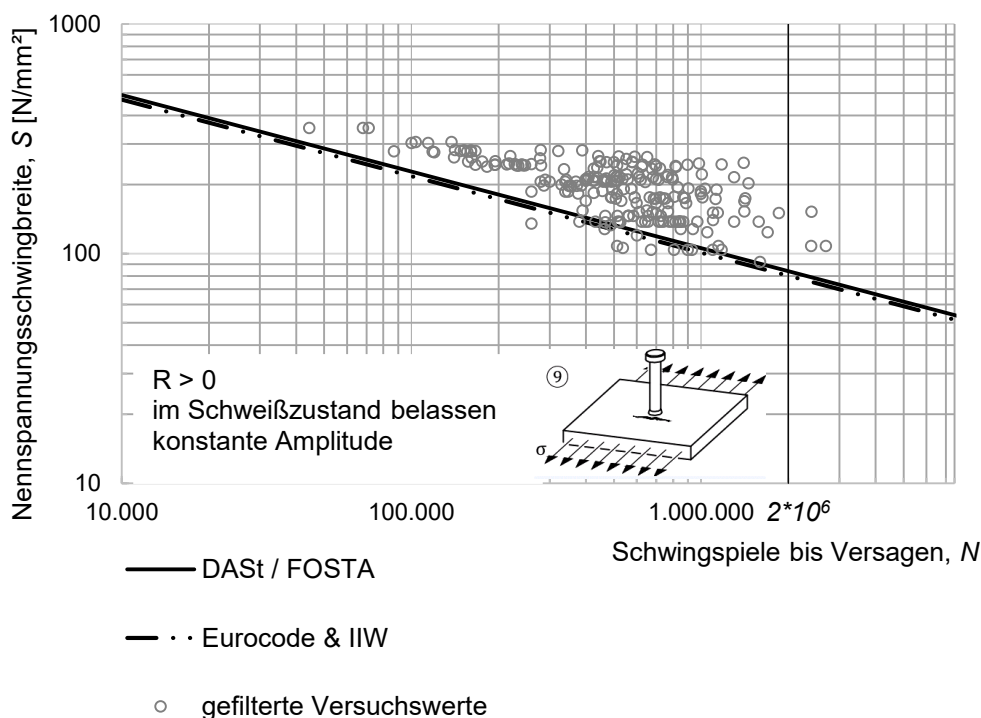


Bild 6-115: Vergleich charakteristischer Wöhlerlinien des Details „Kopfbolzendübel“ mit [1] und [16]

Figure 6-115: Comparison of characteristic S-N curves of detail „welded studs“ with [1] und [16]

6.5 Geschweißte Stöße – Tabelle 8.5

Load carrying welded joints – Table 8.5

Der Tabelle 8.5 (DIN EN 1993-1-9 [1]) werden die Konstruktionsdetails zugeordnet, bei welchen die für den Ermüdungsnachweis maßgebende Beanspruchung entweder voll oder zumindest teilweise über die Schweißnaht in ein weiteres Bauteil übertragen wird. Gegenwärtig umfasst die Tabelle 8.5 Kreuz- und T-Stöße, überlappende Laschenverbindungen, verschiedene Gurtlamellenvarianten, schubbeanspruchte Kehlnähte und geschweißte Ringflanschanschlüsse.

6.5.1 Kreuz- und T-Stöße

Cruciform and Tee joints

Die Konstruktionsdetails Kreuz- und T-Stoß werden eindeutig über die sich vorzugsweise orthogonal schneidenden Fügepartner sowie die Art der Lastübertragung definiert. Im Gegensatz zur Quersteife (siehe Abschnitt 6.4) wird hierbei die Ermüdungsbeanspruchung komplett über die Schweißnähte übertragen.

Mit Ausnahme der vlldurchgeschweißten Ausführungsvariante können die konkurrierenden Rissausgangsbereiche Schweißnahtübergang (Bild 6-116a) und Schweißnahtwurzel (Bild 6-116b) als Besonderheit genannt werden. In DIN EN 1993-1-9 [1] wird diesem Umstand durch die Nachweisführung für mindestens zwei Kerbdetails, nämlich Kerbdetail 1: Schweißnahtübergangsversagen sowie Kerbdetail 3: Schweißnahtwurzelversagen, Rechnung getragen. Eine versagensrelevante Rissinitiierung des Schweißnahtübergangs (Kerbdetail 1) wird in Abhängigkeit der Geometriegrößen Blechdicke t und Abstand der Schweißnahtübergänge l mit einer feingliedrigen Abstufung der Kerbfälle von 80 bis 40

(siehe Bild 6-117), bezogen auf den Grundblechquerschnitt, bewertet. Ein Versagen ausgehend von der Schweißnahtwurzel wird mit Kerbfall 36* bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt bewertet.

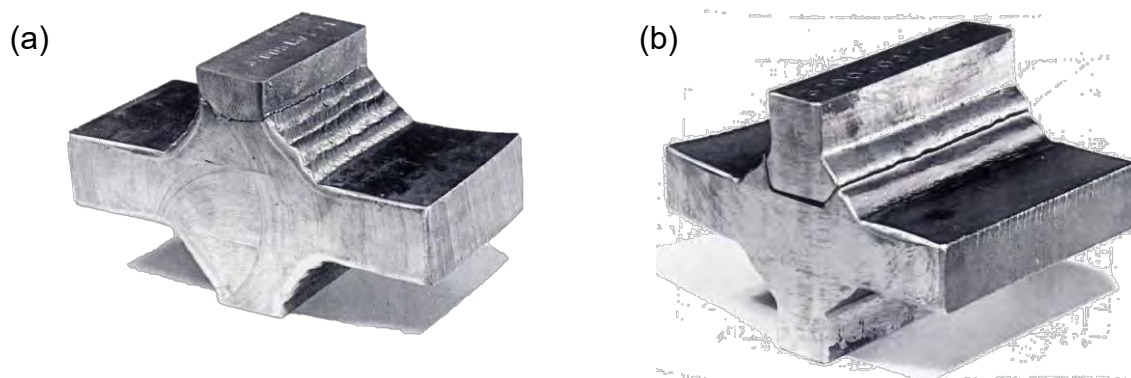


Bild 6-116: Kreuzstoß-Probekörper mit Ermüdungsriss ausgehend vom Schweißnahtübergang (a) sowie von der Schweißnahtwurzel (b) [#60]

Figure 6-116: Cruciform specimens with fatigue crack initiating at weld toe (a) and root (b)

Konstruktionsdetail	Kerbfall	l [mm]	t [mm]
	80	$l < 50$	alle t
	71	$50 < l \leq 80$	alle t
	63	$80 < l \leq 100$	alle t
	56	$100 < l \leq 120$	alle t
	56	$l > 120$	$t \leq 20$
	50	$120 < l \leq 200$	$t > 20$
	45	$l > 200$	$20 < t \leq 30$
	45	$200 < l \leq 300$	$t > 30$
	40	$l > 300$	$30 < t \leq 50$
	36*		

Bild 6-117: Kreuz- und T-Stöße mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-117: Cruciform and Tee joints with fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

6.5.1.1 Steifigkeit des Anschlussbleches bei T-Stößen

Stiffness of the end plate on Tee joints

Die DIN EN 1993-1-9 [1] fordert im Fall eines „verformbaren Anschlussbleches“ (Kerbdetail 2) zusätzlich eine Nachweisführung mit korrigierten Nennspannungen für einen potentiellen Rissausgang an der Außenkante des Anschlussbleches. Diese korrigierte Nennspannung zur Berücksichtigung von Spannungsspitzen am Bauteilrand soll dann entsprechend der Kerbfalleinstufung des Kerbdetails 1 bewertet werden. Jedoch trifft DIN EN

1993-1-9 [1] weder Aussagen über die Art und Weise der Ermittlung der korrigierten Nennspannung noch fehlt ein Kriterium, wann ein „verformbares“ Anschlussblech vorliegt. Eine Abgrenzung zum T-Stoß (Kerbdetail 1) mit ausreichend großer Steifigkeit des Anschlussbleches ist nicht definiert.

6.5.1.2 Verfügbare Versuchsdaten zu Kerbdetail 1 (Schweißnaht-Übergangsversagen)

Available test data for detail 1 (weld toe failure)

Für eine eindeutige Zuordnung der Ermüdungsversuche zu Kerbdetail 1 bzw. Kerbdetail 3 muss der maßgebende Versagensort dokumentiert sein. Daher werden in der nachfolgenden Darstellung (Bild 6-118) der in der Datenbank für das Kerbdetail 1 vorhanden Einzelversuche nur jene gezeigt, für welche der Versagensort eindeutig am Schweißnahtübergang festgestellt wurde. Zudem werden vorab rudimentäre Filterkriterien gewählt. So werden nur Proben im Zustand „wie geschweißt“, also ohne Schweißnahtnachbehandlung oder nachträglicher Wärmebehandlung, berücksichtigt. Des Weiteren werden Ermüdungsversuche in korrosiven Medien, wie bspw. Meerwasser, nicht berücksichtigt.

Trotz dieser Vorauswahl umfasst die in Bild 6-118 dargestellte Datenmenge für das Kerbdetail 1 ca. 400 Einzelversuche aus einer umfangreichen Anzahl von Publikationen und deckt damit zahlreiche Einflussfaktoren ab. Es ist anzumerken, dass jedoch nur Kleinteilversuche an Kreuzstoßproben in der Datenbank vorliegen. Daten von Ermüdungsversuchen an Großbauteilen und/oder T-Stößen liegen nicht vor.

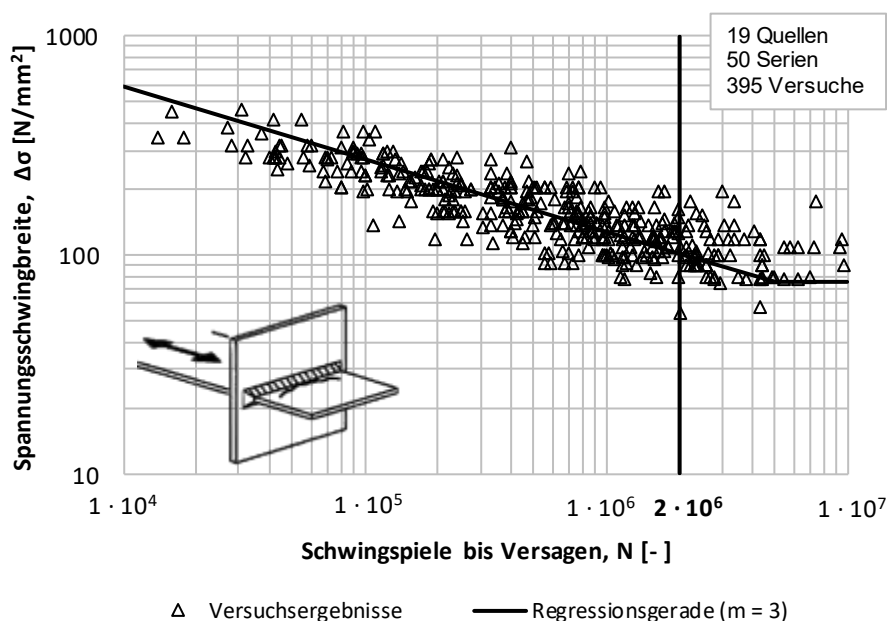


Bild 6-118: Darstellung aller Einzelversuchsdaten zum Kreuzstoß – Kerbdetail 1 (Schweißnahtübergangsversagen, wie geschweißt) [Quellen: #57, #59, #60, #62, #63, #64, #73, #98, #99, #108, #113, #119, #126, #127, #299, #300, #390, #391, #393]

Figure 6-118: Experimental fatigue test data for construction detail 1: Cruciform joints (weld toe failure, as welded)

6.5.1.3 Signifikante Einflussgrößen auf der Widerstandsseite (Kerbdetail 1)

Significant influence parameters on the resistance side (detail 1)

Die Kerbfallabstufung von Kerbdetail 1 nach DIN EN 1993-1-9 [1] erfolgt gegenwärtig feingliedrig in Abhängigkeit der geometrischen Parameter Blechdicke t und Abstand der Schweißnahtübergänge l (Bild 6-117). Bereits in [91] wurden die beiden genannten geometrischen Parameter zur Berücksichtigung des Blechdickeneffekts bei der Kerbfallableitung von Ermüdungsversuchen am Konstruktionsdetail „Quersteife“ verwendet und finden sich auch in anderen Regelwerken wieder. Beispielsweise verwenden die IIW-Empfehlungen [16] die Geometriegrößen Blechdicke t , Abstand der Schweißnahtübergänge l sowie einen zusätzlichen, vom Konstruktionsdetail abhängigen, Exponenten n als globalen Faktor für alle Konstruktionsdetails mit Versagensort am Schweißnahtübergang.

Obwohl zur Beschreibung der Dickenabhängigkeit die beiden Geometriegrößen t und l verbreitet sind, sei an dieser Stelle erwähnt, dass alleine mit diesen Parametern die Geometrie des Konstruktionsdetails „Kreuzstoß“ nicht eindeutig beschrieben werden kann. Wichtige zusätzliche Parameter, wie Nahtanstiegswinkel, Asymmetrie der Schweißnaht und bei nicht durchgeschweißten Anschlüssen die Einschweißtiefe, welche ebenfalls Einfluss auf die Kerbspannungen am maßgebenden Schweißnahtübergang haben können, werden derzeit nicht berücksichtigt.

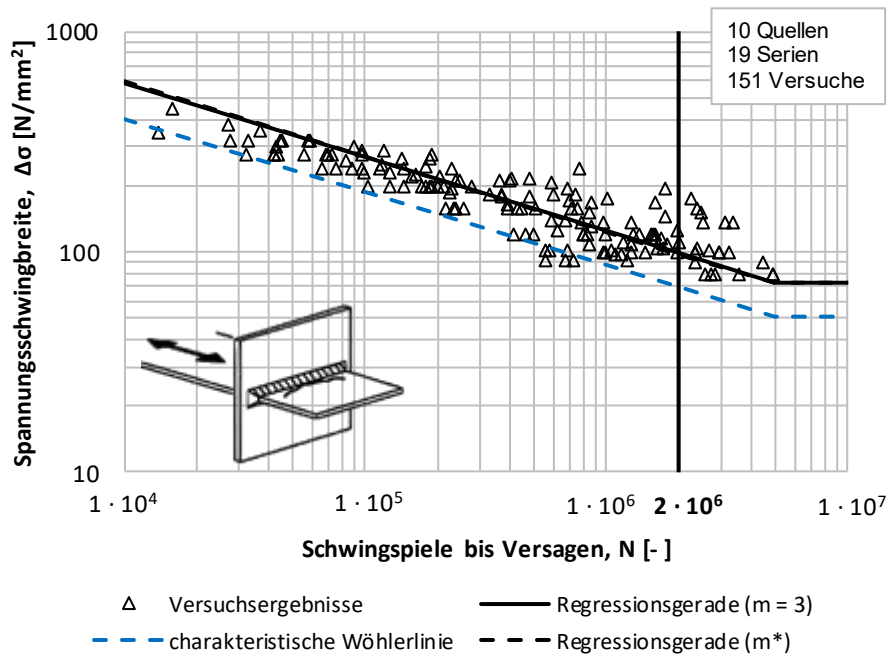
Da die gegenwärtige Datenbasis (Bild 6-120) jedoch nur einen begrenzten Parameterbereich in Bezug auf diese Einflussgrößen abdeckt, lassen sich die Auswirkungen aus den experimentellen Daten nicht umfassend quantifizieren.

6.5.1.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen (Kerbdetail 1)

Fatigue class derivation by selected sources (detail 1)

Für die Kerbfallableitung des Kerbdetails 1 – „Kreuzstoß mit Versagen am Schweißnahtübergang“ werden nur jene Einzelversuche aus Bild 6-118 herangezogen, welche alle nachfolgenden Filterkriterien einhalten:

- Ort der Spannungsermittlung (bspw. Grundblech- oder Schweißnahtquerschnitt) muss bekannt sein
- Keine Schweißnahtnachbehandlung oder nachträgliche Wärmebehandlung
- Probekörper waren zu keiner Zeit stark korrosiven Medien (bspw. Meerwasser) ausgesetzt
- Keine Beschichtung der Ausgangsmaterialien (bspw. Fertigungsbeschichtungen, Zinküberzüge, etc.)
- Versuchsdaten ausschließlich aus Primärquellen
- Serien mit einer Versuchsanzahl von mindestens 5 verwertbaren Einzelversuchen
- Versuche im Zugschwellbereich ($0,0 \leq R < 1,0$)



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 69 [N/mm²]

Bild 6-119: Kerbfallableitung Kreuzstoß mit Schweißnaht-Übergangsversagen (Kerbdetail 1) anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #57, #59, #60, #62, #63, #64, #73, #113, #119, #393)

Figure 6-119: Fatigue classification of cruciform joints with weld toe failure based on filtered test results

Bild 6-119 zeigt die, wie zuvor beschrieben, gefilterten Einzelversuchswerte im Wöhlerdiagramm. Die zugehörige statistische Auswertung mit einer festgelegten Steigung von $m = 3$ ergibt $\Delta\sigma_c = 69 \text{ N/mm}^2$ und bestätigt den Kerbfall 80 nach DIN EN 1993-1-9 [1] nicht. Der gegenwärtige Datenbestand deckt sich besser mit der Kerbfalleinstufung 71 nach der IIW-Empfehlung [16].

Wie bereits beschrieben, wurden geometrische Einflussgrößen, wie bspw. die Grundblechdicke und der Abstand der Schweißnahtübergänge, bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Die vorhandene Datenbasis (Bild 6-120) deckt im Vergleich zu den Angaben nach DIN EN 1993-1-9 [1] nur einen limitierten Parameterbereich ab. Für eine aussagekräftige klassifizierte Auswertung fehlen daher entsprechende experimentelle Ergebnisse.

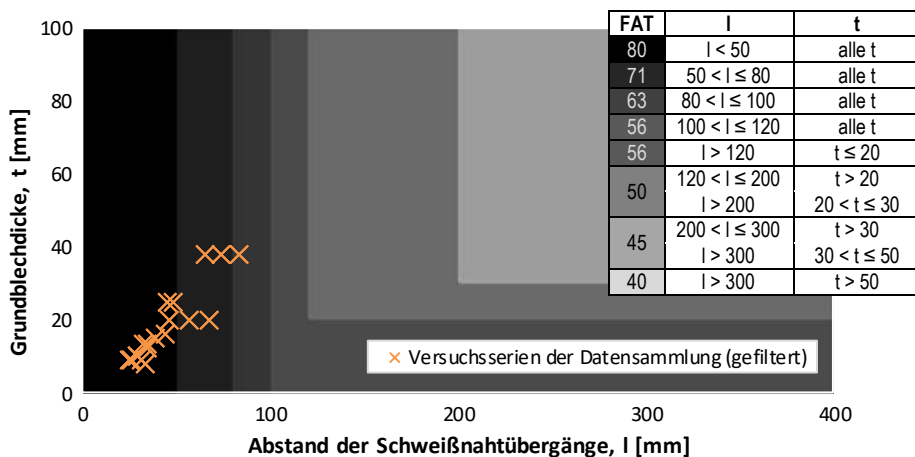


Bild 6-120: Durch die vorhandenen Daten für Kerbdetail 1 erfasster Parameterbereich (links) sowie zugehörige Abstufung der Kerbfälle nach DIN EN 1993-1-9 [1] (rechts)

Figure 6-120: Parameter range covered by the existing data for detail 1 (left) and the corresponding classification of detail categories according to DIN EN 1993-1-9 [1] (right)

6.5.1.5 Verfügbare Versuchsdaten zu Kerbdetail 3 (Schweißnaht-Wurzelversagen)

Available test data for detail 3 (root failure)

Für die Aufnahme der Einzelversuche des Kerbdetails 3 (Bild 6-121) in die folgende Auswertung muss aus Zuordnungsgründen in den jeweiligen Quellen der maßgebende Versagensort an der Schweißnahtwurzel eindeutig dokumentiert sein

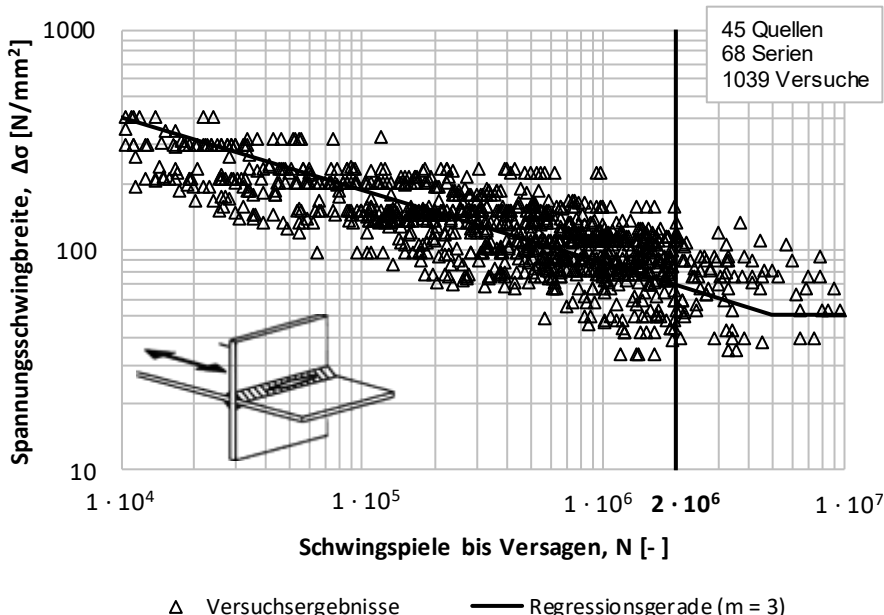


Bild 6-121: Darstellung aller Einzelversuchsdaten zum Kreuzstoß – Kerbdetail 3 (Schweißnahtwurzelversagen, wie geschweißt) [Quellen IDs: #57, #58, #59, #60, #61, #62, #63, #64, #68, #81, #93, #94, #97, #98, #99, #100, #101, #102, #103, #104, #105, #106, #108, #110, #111, #112, #113, #114, #116, #117, #119, #120, #121, #123, #126, #127, #130, #299, #300, #390, #391, #392, #393, #395, #1005]

Figure 6-121: Experimental fatigue test data for construction detail 3: Cruciform joints (root failure, as welded)

Ermüdungsversuche an Proben mit einer Schweißnahtnachbehandlung, nachträglicher Wärmebehandlung oder Kontakt zu hochkorrosiven Medien (bspw. Meerwasser) werden vorab aussortiert (vgl. Kerbdetail 1).

Die resultierende Datenbasis umfasst über 1000 Einzelversuche aus einer sehr umfangreichen Auswahl an Publikationen.

6.5.1.6 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite (Kerbdetail 3)

Significant influence parameters on the resistance side (detail 3)

Eine genauere Betrachtung der einzelnen Versuchsserien des Kerbdetails 3 zeigt, dass einzelne Versuche eine deutlich geringere Lebensdauer, also einen erhöhten Abstand zur Regressionsgeraden, im Vergleich zur übrigen Population aufweisen. Diese „Ausreißer“ korrelieren mit einem Versagensausgang von der Schweißnahtwurzel. Einen Erklärungsansatz hierzu liefert die deutlich höhere Anzahl an Einflussgrößen im Vergleich zu Kerbdetails mit Versagen ausgehend vom Schweißnahtübergang. Hierzu können auszugsweise folgende Einflussparameter genannt werden:

Mangelnde Inspektionsmöglichkeiten der Schweißnahtwurzel

Unregelmäßigkeiten an der Schweißnahtwurzel, insbesondere Wurzelbindefehler, lassen sich schweißprozessbedingt generell nicht ausschließen und können zu einer frühzeitigen Rissinitiierung in diesem Bereich führen. Im Gegensatz zu versagensrelevanten Bereichen an der Bauteiloberfläche (bspw. Schweißnahtübergang) können Schweißnahtfehler und Rissinitiierung an der Wurzel nicht durch visuelle oder, nur sehr bedingt, durch zerstörungsfreie Prüfverfahren detektiert oder gar bewertet werden.

Diskrepanz zwischen Ist- und Soll-Nahtdicke

Das Kerbdetail 3 ist eines der wenigen Konstruktionsdetails, bei welchem die Nennspannung auf den Schweißnahtquerschnitt bezogen wird. Dadurch ist die reale Schweißnahtdicke bei der Auswertung von Ermüdungsversuchen ein signifikanter Einflussfaktor. Während bei fast allen in der Datenbank vorhandenen Versuchsserien die Soll-Nahtdicke dokumentiert wurde, fehlt die Ist-Nahtdicke bei den meisten Quellen. Eine größere Diskrepanz zwischen Soll- und Ist-Nahtdicke führt jedoch zu einer deutlichen Fehleinschätzung der tatsächlich auftretenden Nennspannungsschwingbreiten.

Einbrandtiefe

Obwohl die Einbrandtiefe bei der Ermittlung der Nahtdicke implizit mitberücksichtigt werden kann, wird diese Einflussgröße hier nochmals separat thematisiert. Insbesondere bei Schweißverfahren mit einer großen Einbrandtiefe, bspw. Unterpulverschweißen, muss der Einbrand unbedingt ermittelt und bei der Bestimmung des Schweißnahtquerschnitts mitberücksichtigt werden. Ansonsten wird die real vorliegende Spannungsschwingbreite überschätzt und die Kerbfallableitung kann auf der unsicheren Seite liegen. Bei der hier nachfolgend durchgeführten Kerbfallableitung werden daher nur UP-geschweißte Probekörper mitberücksichtigt, für welche die mittlere Einbrandtiefe dokumentiert wurde. Für die übrigen, mehrheitlich mit dem Lichtbogenhandschweißverfahren gefügten, Probekörper kann die Einflussgröße Einbrandtiefe nicht berücksichtigt werden und muss zu Null angenommen werden. Für Lichtbogenhandschweißungen erscheint diese Vorgehensweise verfahrensbedingt zweckmäßig. Bei MAG-Schweißungen sollte im Einzelfall entschieden werden, da besonders die neuartigen, modifizierten MAG-Lichtbögen auf einen prozess-

sicheren, tiefen Einbrand abzielen. Hier ist bei zukünftigen Ermüdungsversuchen unbedingt der tatsächliche Einbrand, zumindest an einer repräsentativen Auswahl an Schlifflinien und/oder Bruchbildern, zu bestimmen und bei der Auswertung der Ermüdungsversuchsergebnisse zu berücksichtigen (siehe hierzu auch Anhang B – Leitfaden zur Evaluierung von Ermüdungsversuchen).

Mittelspannungsabhängigkeit und Schweißnahteigenstressungen

Die nach [92] auf Druckeigenstressungszustände im Bereich der Schweißnahtwurzel zurückzuführende Mittelspannungsabhängigkeit der Kreuzstoßproben zeigt sich auch qualitativ anhand der vorliegenden Datensammlung von Kleinteilproben. Diese sich günstig auf die Ermüdungsfestigkeit auswirkenden Druckeigenstressungen können auch anhand von Schweißprozesssimulationen, zumindest für eine Auswahl von definierten Randbedingungen, nachgewiesen werden [93]. Allgemeingültige Aussagen sind jedoch aufgrund von mangelnden experimentellen Untersuchungen an Großbauteilen, welche repräsentative und realitätsnahe Eigenstressungszustände abbilden, für das Kerbdetail 3 gegenwärtig nicht möglich.

Art der Beanspruchung

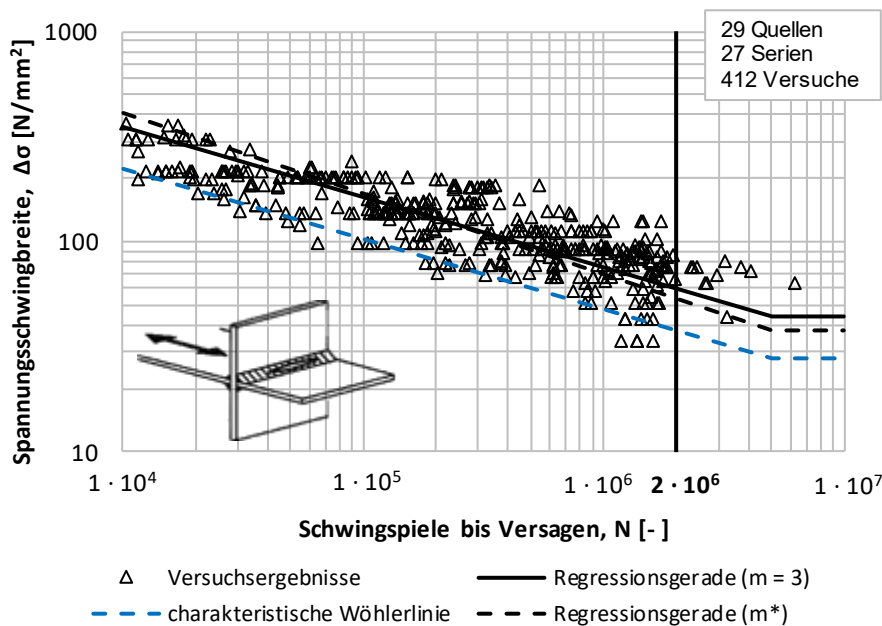
Als weitere Einflussgröße auf die Ermüdungsfestigkeit des Kerbdetails 3 ist die Art der Beanspruchung zu nennen. Aufgrund der mitunter komplexen Spannungsverteilung an der Schweißnahtwurzel können axial- und biegebeanspruchte Probekörper nicht direkt gegenübergestellt werden. Insbesondere bei teildurchgeschweißten Probekörpern mit Biegebeanspruchung können aufgrund des geringer ausfallenden Abstands zur neutralen Faser deutlich höhere Lebensdauern im Vergleich zur reinen Axialbeanspruchung auftreten. Um diesen günstig wirkenden Einfluss auszuschließen, werden nur axialbeanspruchte Versuche für die nachfolgende Kerbfallableitung herangezogen.

6.5.1.7 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen (Kerbdetail 3)

Fatigue class derivation by selected sources (detail 3)

Zur Kerbfallableitung von Kerbdetail 3 – „Kreuzstoß mit Versagen an der Schweißnahtwurzel“ werden die gleichen Filterkriterien wie für Kerbdetail 1 herangezogen.

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, können sich Biegebeanspruchungen im Vergleich zu reinen Normalbeanspruchungen günstig auf die Ermüdungsfestigkeit der Ermüdungsversuche auswirken. Daher werden, auf der sicheren Seite liegend, für die Kerbfallableitung von Kerbdetail 3 nur axialbeanspruchte Proben berücksichtigt. Obwohl für Kleinteilprobekörper mit Schweißnahtwurzelversagen eine Auswertung für ein Spannungsverhältnis $0,0 \leq R < 1,0$ zur Diskussion steht, wird bei der nachfolgenden Auswertung an diesem Filterkriterium festgehalten. Bei einer strengeren Eingrenzung, wie bspw. in [92] mit $0,5 \leq R < 1,0$ vorgeschlagen, ist für die vorhandene Datenbasis aufgrund der großen Streuung der verbleibenden Versuchswerte keine plausible Kerbfallableitung möglich.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 38 [N/mm²]

Bild 6-122: Kerbfalleitung Kreuzstoß mit Schweißnaht-Wurzelversagen (Kerbdetail 3) anhand gefilterter Versuchsergebnisse [Quellen IDs: #57, #58, #59, #60, #61, #62, #63, #64, #93, #94, #97, #98, #100, #101, #102, #104, #105, #106, #110, #111, #112, #113, #117, #120, #127, #130, #390, #393, #1005]

Figure 6-122: Fatigue classification of cruciform joints with root failure based on filtered test results

Trotz umfangreicher Filterkriterien weist die gefilterte Datenbasis (Bild 6-122) eine große Anzahl an für dieses Kerbdetail charakteristischen „Ausreißern“ mit stark reduzierter Lebensdauer auf. Die zugehörige statistische Auswertung mit einer festgesetzten Steigung von $m = 3$ ergibt $\Delta\sigma_c = 38 \text{ N/mm}^2$ und bestätigt zumindest den Kerbfall 36.

Bei der Auslegung der Bauteile muss zudem berücksichtigt werden, dass eine Ermüdungsrissentstehung bei rein visueller Inspektion unbemerkt bleibt und erst bei einem Risswachstum bis hin zur Bauteiloberfläche festgestellt werden kann. Mitunter können zu diesem Zeitpunkt aber schon erhebliche Rissgrößen vorliegen, so dass in Abhängigkeit des Anwendungsfalls diese Versagensform, ausgehend von der innenliegenden Schweißnahtwurzel, vollständig ausgeschlossen werden muss.

6.5.2 Anschlüsse mit überlappenden Bauteilen

Overlapped welded joints

Der überlappende Laschenstoß kann als Verbindung aus einem Grundblech und zwei überlappenden Deckblechen (bzw. Anschlusslaschen) beschrieben werden, welche mit Kehlnähten stoffschlüssig verbunden werden. Bild 6-123 zeigt die Ausführungsvariante nach DIN EN 1993-1-9 [1]. Hinsichtlich einer Schädigung infolge Ermüdung kann zwischen mindestens zwei Versagensbereichen, nämlich den Bereichen der querverlaufenden stirnseitigen Schweißnähte (Versagen im Bereich der Stirnkehlnaht: Kerbdetail 4) und den Bereichen der Schweißnahtenden (Versagen im Bereich der Schweißnahtenden: Kerbdetail 5) unterschieden werden. Außerdem ist nach DIN EN 1993-1-9 [1] ein Nachweis gegen einen möglichen Schubriss in der Flankennaht mit Kerbfall 8 (bzw. 9) der Tabelle 8.5 zu führen.

Als Besonderheiten der Ausführungsvariante nach DIN EN 1993-1-9 [1] sind konkrete Anforderungen an den Randabstand der Schweißnahtenden mit mindestens 10 mm und die Festlegung der Spannungsfläche mit einem Ausbreitungswinkel von 1/2 zur Ermittlung der Nennspannung bei Kerbdetail 4 zu nennen. Aus Sicht des Konstrukteurs fehlen jedoch Angaben zur Nahtdicke der umlaufenden Kehlnaht und eine Mindestlänge der Längsnaht, bzw. ein Mindestwert für die Länge l . Da bei dieser Ausführungsvariante die umlaufende Kehlnaht den Spalt zwischen den einzelnen Halbzeugen nur von maximal drei Seiten verschließt, ist der Korrosionswiderstand bei Anwendung dieses Konstruktionsdetails im Außenbereich als kritisch einzustufen.

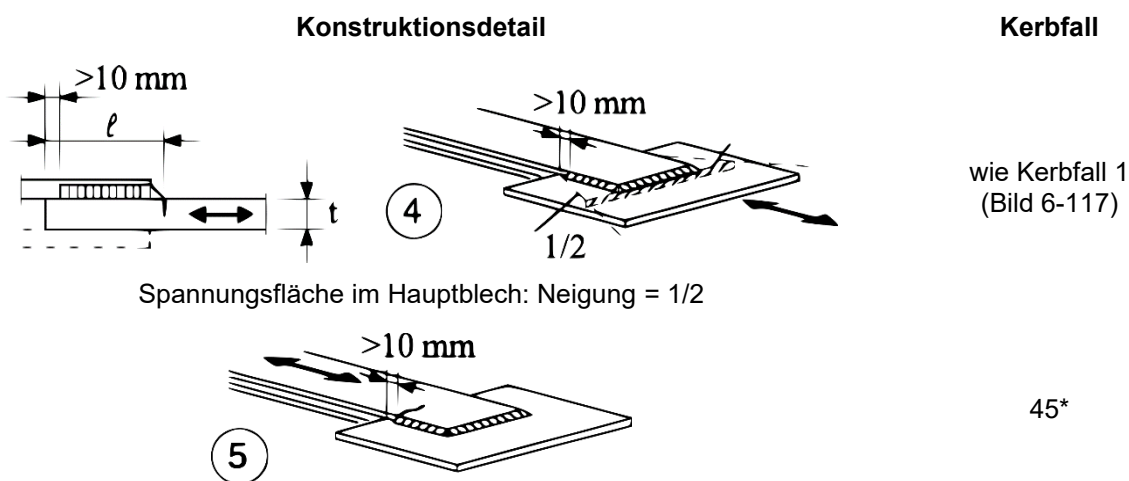


Bild 6-123: Anschlüsse mit überlappenden Bauteilen und Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-123: Overlapped welded joints with fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

6.5.2.1 Verfügbare Versuchsdaten zu Kerbdetail 4 (Versagen im Bereich der Stirnkehlnaht)

Available test data for detail 4 (failure at the area of front side weld)

Für die konkrete Ausführungsvariante nach DIN EN 1993-1-9 [1] mit umlaufenden Schweißnähten (Stirn- und Längskehlnähte) sind gegenwärtig keine Versuchsdaten in der Datenbank vorhanden. Die Datenbasis von Kerbdetail 4 (Bild 6-124) beschränkt sich auf Versuchsergebnisse für Probekörper, bei welchen ausschließlich die querverlaufende Stirnkehlnaht ausgeführt wurde.

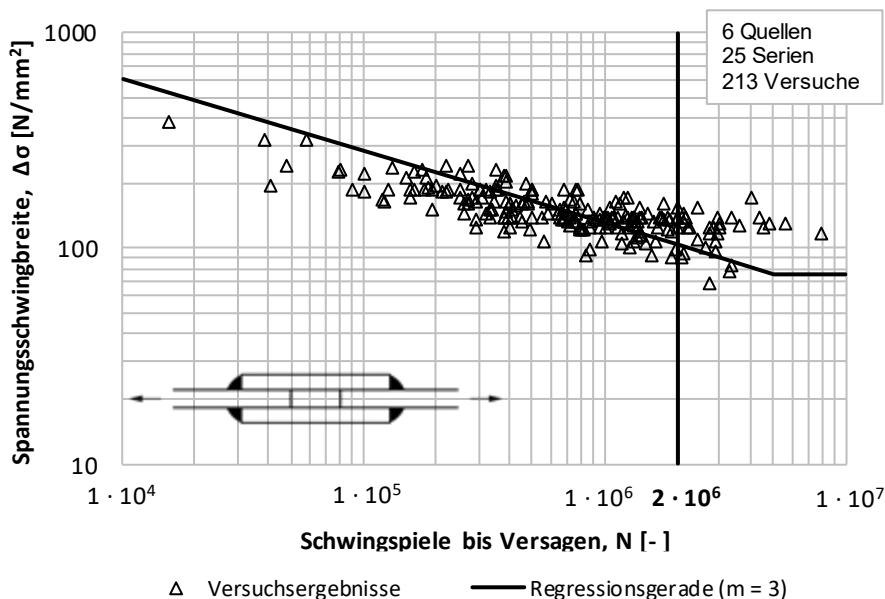


Bild 6-124: Darstellung aller Einzelversuchsdaten zum Kerbdetail 4 – Versagen im Bereich der Stirnkehlnaht (wie geschweißt) [Quellen IDs: #12, #68, #91, #95, #113, #133]

Figure 6-124: Experimental fatigue test data for construction detail 4 – failure at the area of front side weld (as welded)

Bei weiterer Betrachtung der Versagensbereiche dieses Probekörpertyps lässt sich der Ort der maßgebenden Rissinitiiierung weiter unterteilen. Vergleichbar mit dem Versagen an nicht durchgeschweißten Kreuzstößen kann einerseits ein Schweißnahtübergangsversagen (Bild 6-125a), andererseits ein Schweißnahtwurzelversagen (Bild 6-125b) festgestellt werden. Wie auch beim Kreuzstoß, kann angenommen werden, dass die unterschiedlichen Orte der maßgebenden Rissinitiiierung zu einer unterschiedlichen Kerbfalleinstufung führen. Eine differenzierte Betrachtung in Bezug auf Schweißnahtübergangsversagen (nachfolgend Kerbdetail 4a) und Schweißnahtwurzelversagen (nachfolgend Kerbdetail 4b) erscheint sinnvoll.

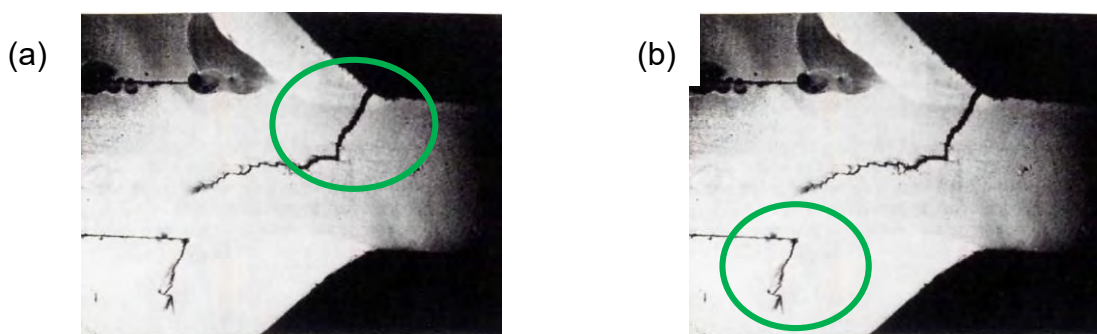


Bild 6-125: Überlappende Laschenverbindung mit Ermüdungsrissen ausgehend vom Schweißnahtübergang (a) sowie von der Schweißnahtwurzel (b) [#91]

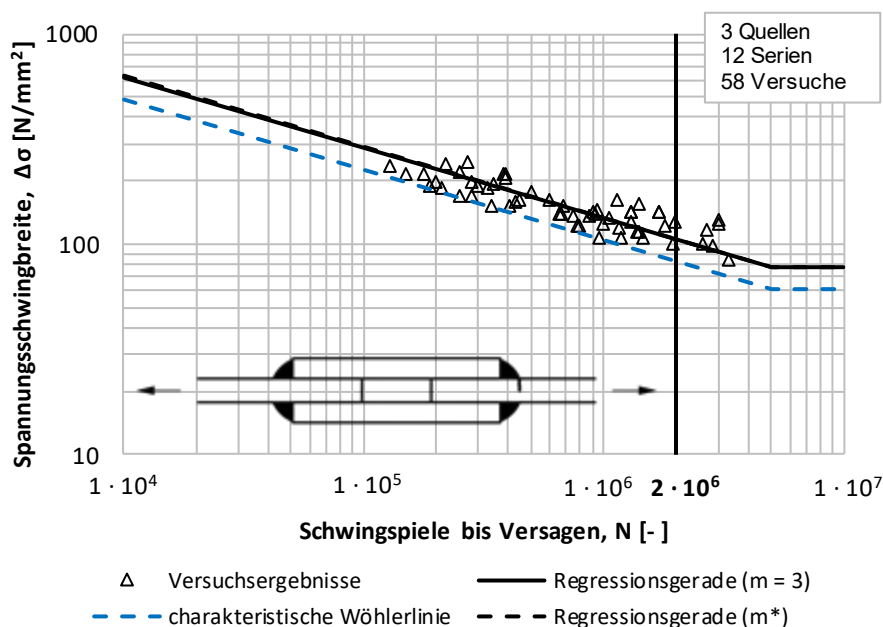
Figure 6-125: Overlapped welded joints with fatigue crack initiation at weld toe (a) and root (b)

6.5.2.2 Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse mit Schweißnaht-Übergangsversagen der Stirnkehlnaht (Kerbdetail 4a)

Evaluation of filtered test results with weld toe failure at front side weld (detail 4a)

Für die Auswertung werden nur die Einzelversuche aus Bild 6-124 herangezogen, welche nachweislich am Schweißnahtübergang der Stirnkehlnaht versagt haben. Die Spannungen sind auf den Grundblechquerschnitt bezogen. Zudem werden folgende weitere Filterkriterien gewählt:

- Ort der Spannungsermittlung (bspw. Grundblech-, Deckblech- oder Schweißnahtquerschnitt) muss bekannt sein
- Keine Schweißnahtnachbehandlung oder nachträgliche Wärmebehandlung
- Versuchsdaten ausschließlich aus Primärquellen
- Nur Versuche im Zugschwellbereich ($0,0 \leq R < 1,0$)
- Nur niedriglegierte Baustähle
- Keine Kleinstteilprobekörper (bspw. Probekörper mit einer Prüfbreite von nur wenigen Millimetern)



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 82 [N/mm²]

Bild 6-126: Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse mit Schweißnaht-Übergangsversagen an der Stirnkehlnaht (Kerbdetail 4a) [Quellen IDs: #68, #91, #113]

Figure 6-126: Evaluation of filtered test results with weld toe failure at front side weld (detail 4a)

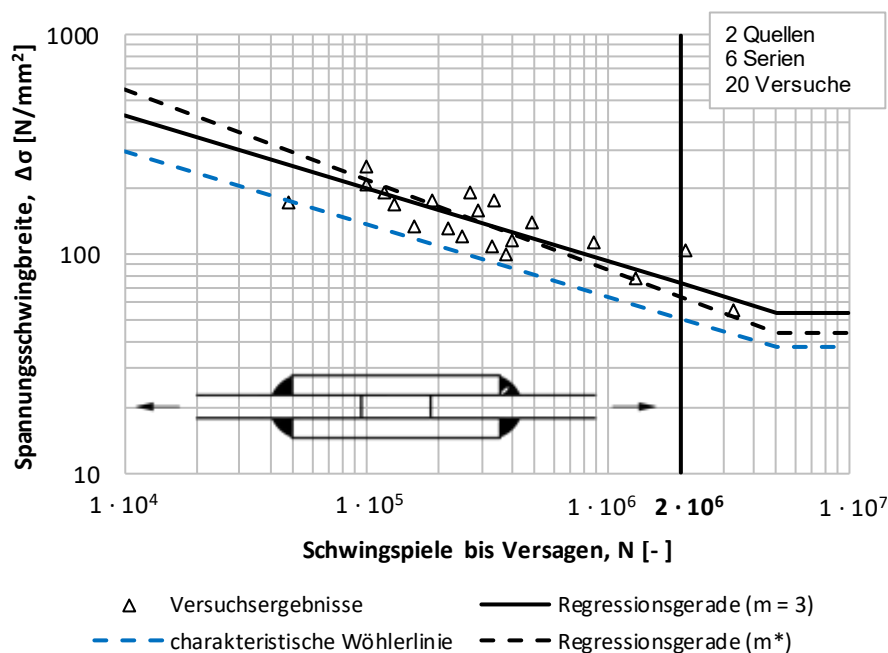
Resultierend aus dem gewählten Filteralgorithmus können 58 Versuche aus drei unterschiedlichen Primärquellen für die statistische Auswertung herangezogen werden. Die statistische Auswertung liefert für eine Laschenverbindung mit ausschließlich ausgeführter Stirnnaht einen Kerbfall 80 und liegt damit auf dem gleichen Niveau, wie die Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1] für $l \leq 50$ mm mit ausgeführten Längsnähten. Das Ergebnis der Auswertung liegt damit 2 Kerbfälle über den Empfehlungen des IIW [16] mit Kerbfall 63 für überlappende, symmetrische Laschenverbindungen. Im Gegensatz zur DIN EN 1993-1-9 [1] besitzt das Konstruktionsdetail nach IIW-Empfehlungen, wie auch

die Probekörper der gefilterten Datenbasis, nur die querverlaufende Stirnkehlnaht und unterscheidet sich damit von der EN 1993-1-9 [1].

6.5.2.3 Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse mit Schweißnaht-Wurzelversagen der Stirnkehlnaht (Kerbdetail 4b)

Evaluation of filtered test results with root failure at front side weld (detail 4b)

Bei einem geringeren Prozentsatz der Einzelversuche aus Bild 6-124 kann ein Schweißnahtwurzelversagen als maßgebend festgestellt werden. Für die Auswertung von Kerbdetail 4b werden daher nur die Versuche herangezogen, welche ein Versagen ausgehend von der Schweißnahtwurzel der Stirnkehlnaht aufzeigen. Mit Ausnahme des Versagenssorts werden für die gleichen Filterkriterien wie für Kerbdetail 4a (vorangegangener Abschnitt) verwendet.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 51 [N/mm²]

Bild 6-127: Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse mit Schweißnaht-Wurzelversagen an der Stirnkehlnaht (Kerbdetail 4b) [Quellen IDs: #91, #113]

Figure 6-127: Evaluation of filtered test results with root failure at front side weld (detail 4b)

Bild 6-127 zeigt die gefilterte Datenbasis des Kerbdetails 4b. Die dargestellten Spannungsschwingbreiten sind auf den Schweißnahtquerschnitt bezogen, was die Regel für Kerbdetails mit Schweißnahtwurzelversagen ist. Aufgrund der geringen Anzahl von 20 gefilterten Einzelversuchen kann nur ein kleiner Einflussparameterbereich abgedeckt werden. Dennoch ist ein direkter Vergleich mit Kerbdetail 3 (Kreuzstoß mit Schweißnahtwurzelversagen – Bild 6-122) möglich. Trotz weniger Versuchsdaten ist eine erhöhte Streuung erkennbar, mit Tendenz zu Einzelversuchen mit signifikant geringerer Lebensdauer. Wie bereits der Ausführung zu Kerbdetail 3 zu entnehmen, scheinen diese „Ausreißer“ charakteristisch für Kerbfälle mit einem Ermüdungsversagen ausgehend von der Schweißnahtwurzel zu sein. Erklärungsansätze, wie mangelnde Inspektionsmöglichkeiten der Schweißnahtwurzel, Diskrepanz zwischen Ist- und Soll-Nahtdicke und die nicht dokumentierten tatsächliche Einschweißtiefe wurden bereits beschrieben.

Die statistische Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse liegt mit $\Delta\sigma_c = 51 \text{ N/mm}^2$ über der Kerbfalleinstufung nach IIW-Empfehlungen mit FAT 45. Hierbei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass die Versuchsbasis lediglich Spannungsverhältnisse $R \leq 0,26$ abdeckt, was nach [92] (siehe Abschnitt 6.5.1) möglicherweise zu einer Kerbfalleinstufung auf der unsicheren Seite führen kann.

6.5.2.4 Kerbfalleitung Detail 4

Fatigue class derivation detail 4

Wie bereits dargelegt berücksichtigt DIN EN 1993-1-9 [1] für die überlappende Laschenverbindung nur ein Schweißnahtübergangsversagen im Bereich der querverlaufenden Stirnkehlnaht. Aufgrund der gegenwärtigen Datenbasis kann ein Kerbfall 80 abgeleitet werden. Dagegen ist ein Schweißnahtwurzelsversagen in diesem Bereich aktuell nach DIN EN 1993-1-9 [1] nicht berücksichtigt, obwohl diese Versagensform bei einigen Probekörpern festgestellt werden kann. Da die Probekörper im Vergleich zur Ausführungsvariante nach DIN EN 1993-1-9 [1] keine Längsnähte aufweisen, kann eine potenziell günstige Wirkung auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnahtwurzel anhand der vorliegenden Versuchsdaten nicht untersucht werden. Da die Nahtdicke (a -Maß) maßgebenden Einfluss auf ein mögliches Schweißnahtwurzelsversagen hat, sollte diese daher in jedem Falle für das Konstruktionsdetail vorgeben werden. Alternativ ist eine separate Nachweisführung (vgl. IIW-Empfehlungen [16]) für das Schweißnahtwurzelsversagen denkbar. Da die Datenbasis für diese Versagensvariante bisher nur einen geringen Einflussparameterbereich abdeckt, sollte dies bei der Kerbfalleitung durch eine konservative Abschätzung berücksichtigt werden.

6.5.2.5 Verfügbare Versuchsdaten zu Kerbdetail 5 (Versagen im Bereich der Schweißnahtenden)

Available test data for detail 5 (failure at the start/stop of weld)

Die Datenbasis für Kerbdetail 5, Versagen im Bereich der Schweißnahtenden, umfasst nur Probekörper mit ausschließlich ausgeführten Längsnähten. Bei diesem Probekörpertyp kann ein Risswachstum sowohl in das Grundblech als auch in das Deckblech beobachtet werden. Die Datenbasis enthält neben Deckblechen aus Flachstahl auch Deckbleche aus L- und U-Profilen (Bild 6-128).

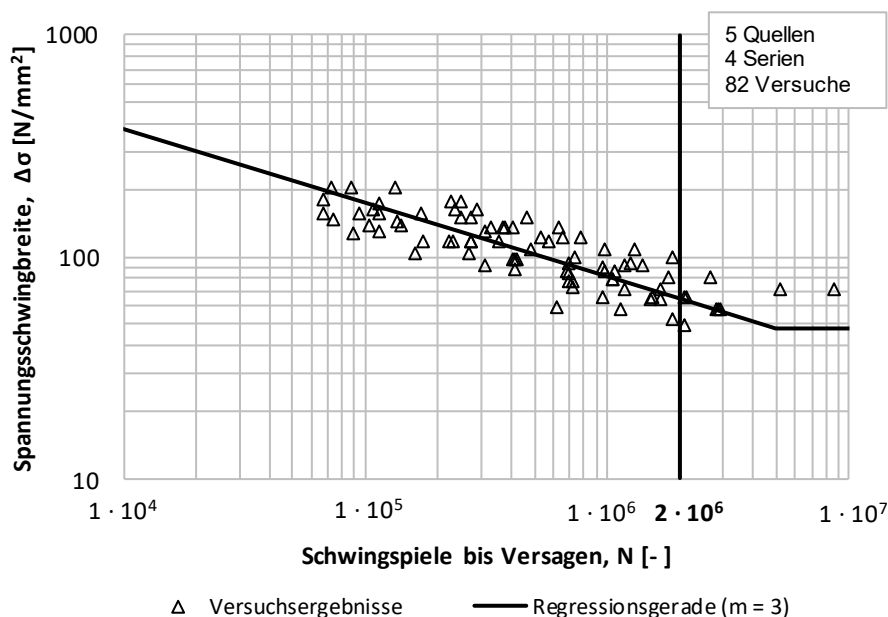


Bild 6-128: Darstellung aller Einzelversuchsdaten zum Kerbdetail 5 – Versagen im Bereich der Schweißnahtenden (wie geschweißt) [Quellen IDs: #74, #78, #84, #293, #294]

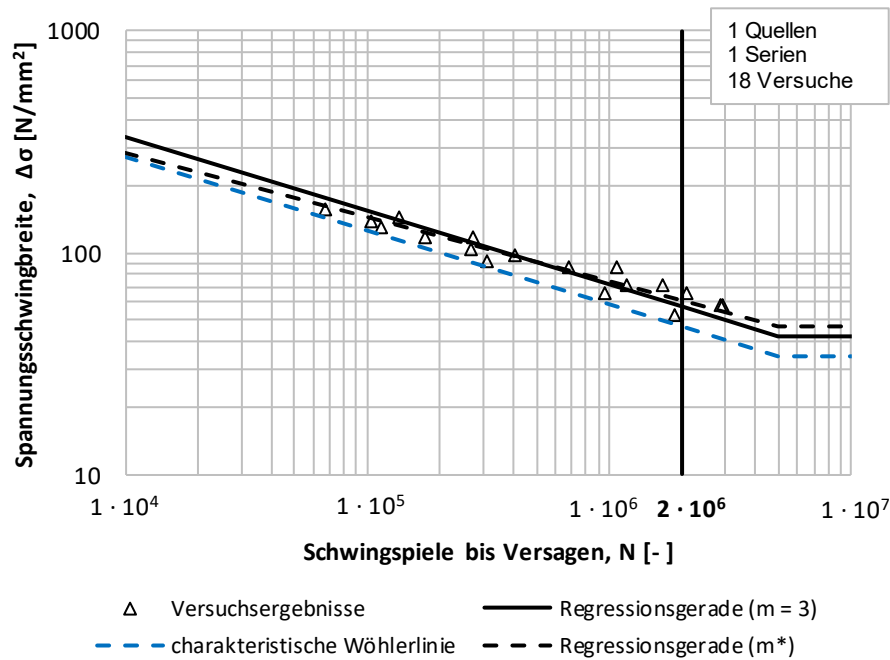
Figure 6-128: Experimental fatigue test data for construction detail 5 – failure at the start/stop of weld (as welded)

6.5.2.6 Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse mit Versagen im Bereich der Schweißnahtenden – Kerbdetail 5

Evaluation of filtered test results with failure at the start/stop of weld (detail 5)

Bei der konkreten Ausführungsvariante nach DIN EN 1993-1-9 [1] sind die Schweißnahtenden der Längsnähte so angeordnet, dass ein Risswachstum nur in Richtung der Deckbleche erfolgen kann. Daher werden nachfolgend nur diejenigen Versuchsergebnisse betrachtet, bei welchen das Deckblech für das Ermüdungsversagen maßgebend war. Um Einflüsse aus sekundären Biegemomenten auszuschließen, werden zudem nur symmetrische Probekörpertypen, also keine einseitigen oder L-profilförmigen Deckbleche, zugelassen. Zudem werden folgende weitere Filterkriterien gewählt:

- Ort der Spannungsermittlung (bspw. Grundblech-, Deckblech- oder Schweißnahtquerschnitt) muss bekannt sein
- Keine Schweißnahtnachbehandlung oder nachträgliche Wärmebehandlung
- Versuchsdaten ausschließlich aus Primärquellen
- Nur Versuche im Zugschwellbereich ($0,0 \leq R < 1,0$)



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 46 [N/mm²]

Bild 6-129: Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse mit Versagen im Bereich der Schweißnahtenden (Kerbdetail 5) [Quellen IDs: #74]

Figure 6-129: Evaluation of filtered test results with failure at the start/stop of weld (detail 5)

Die gefilterte Datenbasis für Kerbdetail 5 ist in Bild 6-129 dargestellt und deckt mit 18 Einzelversuchen aus einer Primärquelle nur eine geringe Anzahl von Einflussgrößen ab. Die dargestellten Spannungsschwingbreiten sind auf den Nennquerschnitt des versagensrelevanten Deckbleches bezogen. Die statistische Auswertung dieser gefilterten Versuchsergebnisse ergibt $\Delta\sigma_c = 46$ N/mm².

Da alle Versuche aus einer Primärquelle [#74] stammen, sollte die Kerbfallabstufung kritisch hinterfragt werden. Das schmale Streuband lässt daran zweifeln, ob bereits eine ausreichend repräsentative Stichprobe an Versuchsdaten mit variierenden Einflussparametern für dieses Kerbdetail vorliegt.

Schweißnahtqualität

Insbesondere bei Kerbdetail 5 kann die Ausführungsqualität der Schweißnaht am Schweißnahtende bzw. -anfang signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben. Mitunter variiert diese aber in Abhängigkeit des Schweißprozesses, der Schweißposition, des Personals und weiteren Randbedingungen gravierend. Besonders die MSG-Verfahren neigen prozessbedingt zu Bindefehlern und undefinierten Überhöhungen am Schweißnahtanfang sowie zu Endkraterrissen und weiteren Ungängen am Schweißnahtende. Dagegen deckt die gegenwärtige, gefilterte Datenbasis nur lichtbogenhandschweißte Probekörper ab. Außerdem kommt hinzu, dass die Bewertungsnorm für Schmelzschweißverbindungen DIN EN ISO 5817 [19] für einige der ermüdungsrelevanten Unregelmäßigkeiten keine konkreten Anforderungen definiert.

6.5.3 Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern

Cover plates on beams and plate girders

Gurtlamellen sind lokale, der Beanspruchung angepasste Verstärkungen und dienen bei Biegeträgern zur Querschnittsoptimierung, Ressourceneinsparung und Gewichtsreduktion der Tragkonstruktion. Im Brückenbau sind Gurtlamellendicken von 50 mm und mehr nicht unüblich. Hinsichtlich Ermüdung sind insbesondere die Stirnseiten der Gurtlamelle als kritisch einzustufen, da hier infolge des Steifigkeitssprungs hohe Spannungskonzentrationen auftreten können. Für diesen Übergangsbereich gibt es verschiedene Ausführungsvarianten, mit welchen deutlich unterschiedliche Ermüdungsfestigkeiten erzielt werden.

Bild 6-130 zeigt alle Einzelversuchsdaten in der Datenbank, welche dem Konstruktionsdetail Gurtlamelle zugeordnet sind. Mit 45 Versuchsserien aus 8 unterschiedlichen Quellen erscheint die Datenbasis auf den ersten Blick umfangreich zu sein. Hervorzuheben ist, dass anteilig ca. 85 % der 740 Versuche an Großbauteilen durchgeführt wurden. Der am häufigsten auftretende Probekörpertyp sind auf I-Träger geschweißte Lamellen, die unter Biegung geprüft wurden.

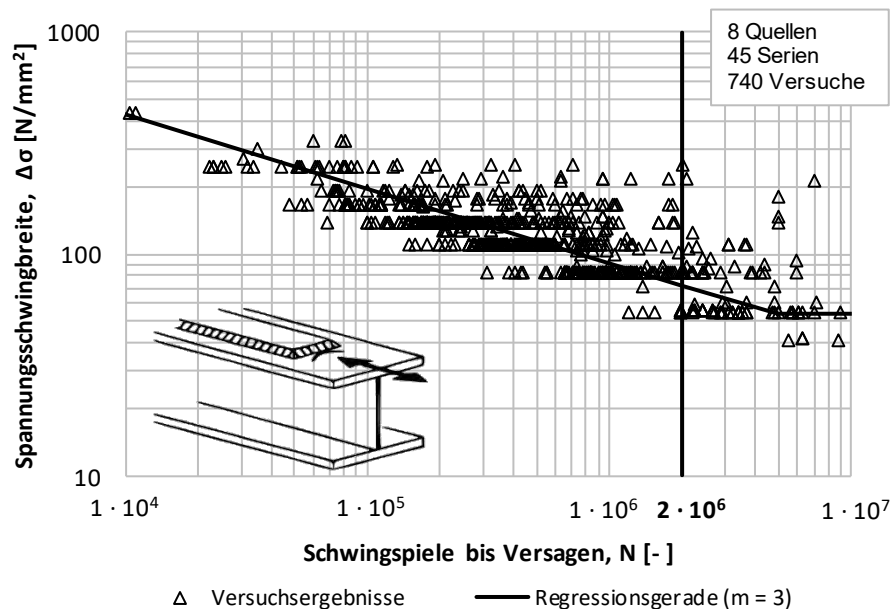


Bild 6-130: Darstellung aller Einzelversuchsdaten zur aufgeschweißten Gurtlamelle [Quellen IDs: #28, #29, #170, #274, #276, #1000, #1001, #1002]

Figure 6-130: Experimental fatigue test data for cover plates on beams and plate girders

Die in Bild 6-130 dargestellte Versuchsdatensammlung enthält außerdem Sonderformen, wie mehrlagige oder nebeneinander aufgeschweißte Lamellen. Bei genauerer Betrachtung der Einzelversuchsdaten fallen vermehrt „Ausreißer“, also Einzelversuche mit deutlich größerem Abstand zur Regressionsgeraden, mit einer deutlich höheren Lebensdauer auf. „Ausreißer“ mit niedriger Lebensdauer sind dagegen selten. Dies ist mit den gewählten Filterkriterien zu begründen, da Probekörper, welche im Bereich der Stirnnaht hinsichtlich Ermüdungsfestigkeit optimiert wurden, noch nicht ausgefiltert sind. Alle Optimierungsvarianten zielen auf eine Reduktion des Steifigkeitssprungs und damit der Span-

nungskonzentration im Bereich der Gurtlammellenenden ab. Zu diesen Optimierungsvarianten gehören bspw. eine Schweißnahtnachbehandlung der Stirrnaht, Reduktion des Nahtanstiegswinkels und/oder eine Anpassung der Gurtlamellenform.

Nach DIN EN 1993-1-9 [1] wird der „Normalausführung“ (Kerbdetail 6) mit oder ohne Stirrnaht in Abhängigkeit der Gurtblechdicke t und Gurtlamellendicke t_c ein Kerbfall zwischen 56* bis 36 zugeordnet (Bild 6-131). Das Kerbdetail 6 ist erst ab einer Lamellenlänge von mindestens 300 mm anzuwenden, ansonsten wird auf die Einstufung nach Kerbdetail 1 (Schweißnahtübergangsversagen am Kreuzstoß) verwiesen. Bei Lamellen, die breiter als das Gurtblech sind, muss nach DIN EN 1993-1-9 [1] eine Stirrnaht ausgeführt werden, welche zusätzlich am Schweißnahtübergang zu beschleifen ist.

Konstruktionsdetail	$t_c < t$	$t_c \geq t$	Kerbfall
	$t \leq 20$	-	56*
	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$	50
	$30 < t \leq 50$	$20 < l \leq 30$	45
	$t > 50$	$30 < l \leq 50$	40
	-	$t > 50$	36

Bild 6-131: „Normalausführung“ der Gurtlamelle auf Walz- und geschweißten Trägern mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-131: Standard design of cover plates on beams and plate girders with fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

6.5.3.1 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen für die „Normalausführung“ am Gurtlamellenende – Kerbdetail 6

Fatigue class derivation by selected sources for cover plates on beams and plate girders “standard design” – Detail 6

Für die Kerbfallableitung des Konstruktionsdetails Gurtlamelle in „Normalausführung“ (Kerbdetail 6) muss die vielfältige Datensammlung aus Bild 6-130 deutlich eingeschränkt werden. Hierzu werden nachfolgende Filterkriterien gewählt:

- Geltungsbereich von Kerbdetail 6 nach DIN EN 1993-1-9 [1] (bspw. Gurtlamellenlängen von mindestens 300 mm)
- Keine Optimierung der Lamellenform oder der Stirrnaht (bspw. spitz zulaufende Lamellenform oder Reduktion des Nahtanstiegswinkels)
- Nur mittig aufgeschweißte, einlagige Lamellen
- Ort der Spannungsermittlung (bspw. Grundblech- oder Lamelle) muss bekannt sein
- Versuchsdaten ausschließlich aus Primärquellen
- Nur Versuche im Zugschwellbereich ($0,0 \leq R < 1,0$)

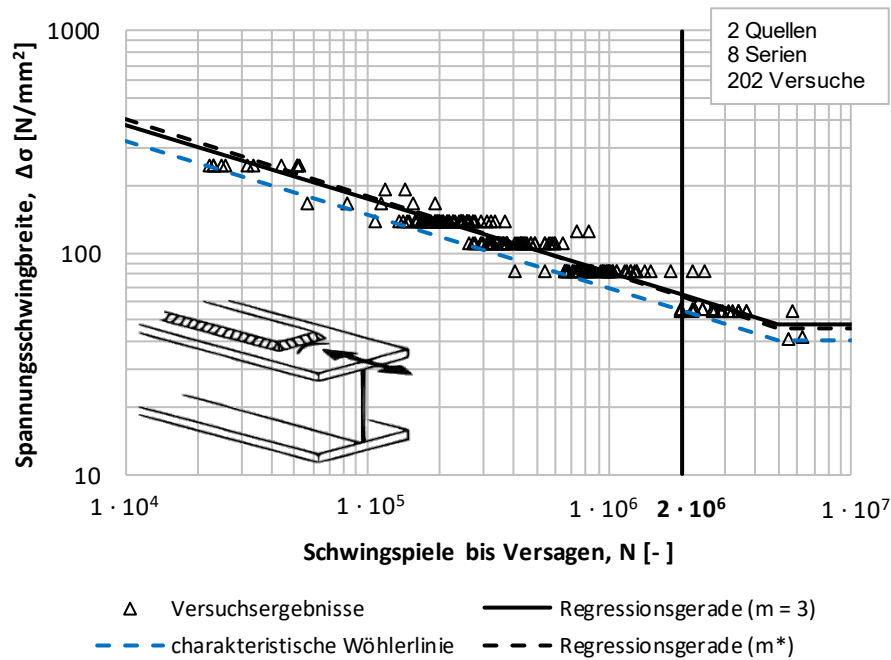


Bild 6-132: Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse der Gurtlamelle in „Normalausführung“ (Kerbdetail 6) [Quellen IDs: #28, #276]

Figure 6-132: Evaluation of filtered test results of cover plates on beams and plate girders – standard design (detail 6)

Die in Bild 6-132 dargestellte, gefilterte Datenbasis setzt sich aus über 200, ausschließlich an Großbauteilen durchgeführten Einzelversuchen zusammen. Der Großteil der Versuche ist auf die Forschungstätigkeit von Fisher [#28] in den 1970er-Jahren zurückzuführen. Nach DIN EN 1993-1-9 [1] können die berücksichtigten Versuchsdaten alle dem Kerbfall 50 zugeordnet werden, da bei allen Probekörpern die Gurtlamellendicke t_c größer als Gurtblechdicke t sowie die Gurtblechdicke kleiner 20 mm war (vgl. Bild 6-131). Die statistische Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse ergibt einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit bei 2 Mio. Schwingspielen von $\Delta\sigma_c = 55$ N/mm² und bestätigt den Kerbfall nach DIN EN 1993-1-9 [1] für das vorliegende Blechdickenverhältnis. Andere Blechdicken bzw. Blechdickenverhältnisse können mit der gegenwärtig vorliegenden Datenbasis jedoch nicht abgedeckt werden.

Bei der Kerbfalleinstufung ist außerdem zu beachten, dass alle Versuche im Zustand wie geschweißt vorliegen. Die Sonderausführungsform von Kerbdetail 6 mit breiterer Lamelle als das Gurtblech und zusätzlich beschliffenem Schweißnahtübergang wird ebenfalls experimentell nicht abgedeckt.

6.5.3.2 Optimierte Ausführungsvarianten – bspw. Kerbdetail 7

Optimized design variants – e.g. detail 7

Dass die Ausführung der Gurtlamelle besonders an deren Enden erheblichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat, war schon früh bekannt. Bereits 1937 veröffentlichte Graf einen Fachzeitschriftenaufsatz [#274], in welchem er seine experimentellen Untersuchungen zur Ausführung des Endbereichs beschreibt. Dabei wurde u. a. die Lamellenform,

Anordnung der Schweißlagen und Art der Nachbearbeitung an Kleinstermüdungsversuchsserien untersucht. Ziel aller Optimierungsversuche bei diesem Konstruktionsdetail war stets eine Steigerung der Ermüdungsfestigkeit. Bei der Bewertung der Ausführungsvariante spielen heute neben der Ermüdungsfestigkeit auch andere Faktoren, insbesondere die wirtschaftliche Herstellung, eine entscheidende Rolle. Besonders bei großen Gurtlamellendicken ist das zunehmende Schweißnahtvolumen einer der treibenden Kostenfaktoren.

DIN EN 1993-1-9 [1] enthält mit Kerbdetail 7 eine Ausführungsvariante mit verstärkter Stirnnaht, welche in den Kerbfall 56 eingestuft wird (Bild 6-133). Bei dieser Variante ist die Stirnnaht blecheben zu beschleifen und für Lamellendicken $t_c > 20$ mm zudem eine Neigung von $1/4$ vorzusehen. Weiter ist die Stirnnaht mindestens um die Länge $5 \cdot t_c$ um die Stirnseite der Lamelle zu führen. Für diese Ausführungsvariante sind gegenwärtig jedoch keine experimentellen Versuchsdaten bekannt. Die Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1] kann daher auf Grundlage von experimentellen Ergebnissen nicht bestätigt werden. Auch im Hintergrunddokument zu DIN EN 1993-1-9 [4] sind keine Quellen oder Versuchsdaten gelistet. Dort ist lediglich ein Hinweis zu finden, dass das Konstruktionsdetail aus den Empfehlungen der IIW [16] übernommen worden sei. Betrachtet man jedoch die aktuelle Variante nach den IIW-Empfehlungen, dann fallen entscheidende konstruktive und bemessungsrelevante Unterschiede auf. Die Abschrägung des Lamellenendes nach IIW-Empfehlungen ist anstatt $1/4$ mit $1/3$ angegeben und die Schweißnahtdicke ist eindeutig vorgegeben, nämlich gleich der halben Lamellendicke. Die Kerbfalleinstufung nach IIW-Empfehlungen berücksichtigt zudem einen Einfluss des Blechdickenverhältnisses auf die Ermüdungsfestigkeit. Die Kerbfalleinstufung liegt zwischen FAT 71 und FAT 56.

An der Ausführungsvariante nach Kerbdetail 7 der DIN EN 1993-1-9 [1] ist insbesondere die fehlende Angabe zur Schweißnahtdicke zu kritisieren. In Kombination mit der sehr flachen Neigung von maximal $1/4$ bei dieser Variante ist ein sich erst sehr spät ankündigendes Schweißnahtwurzelsversagen der Stirnnaht wahrscheinlich.

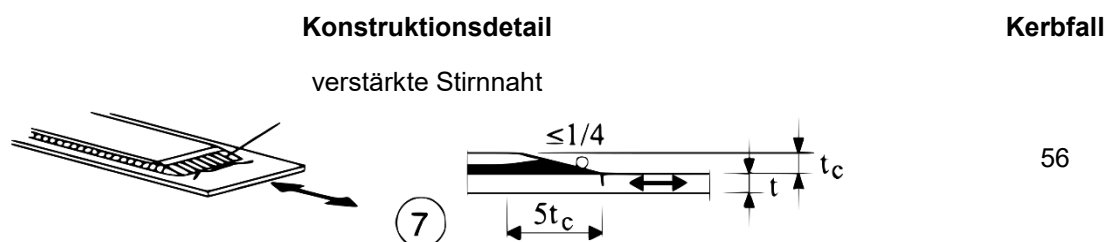


Bild 6-133: Gurtlamelle mit verstärkter Stirnnaht auf Walz- und geschweißten Trägern mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-133: Cover plates on beams and plate girders with reinforced transverse weld and fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Eine im Brückenbau häufig zur Anwendung kommende Ausführungsvariante ist die in Bild 6-134 nach dem Nationalen Anhang der DIN EN 1993-2 [94] dargestellte Variante, welche mit Kerbfall 71 eingestuft wird. Als Anforderung müssen der Schweißnahtübergang kerbfrei und die Ecken der Stirnnaht abgerundet sein, zudem ist die Abschrägung ist mit $1/2$ vorgegeben. Der Querschnitt und die Länge der Stirnnaht ergeben sich durch die geometrischen Vorgaben.

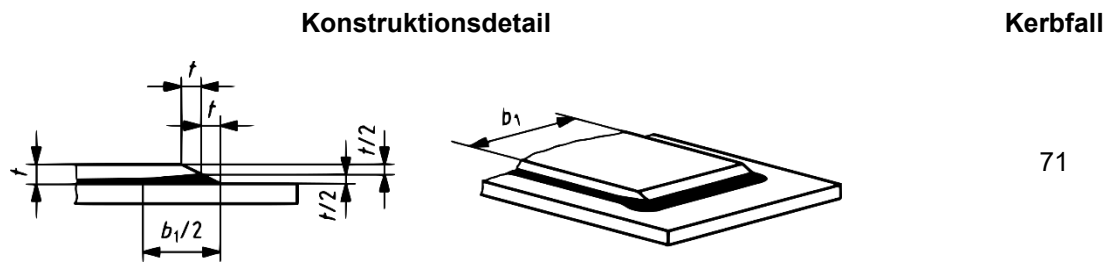


Bild 6-134: Gurtlamelle mit verstärkter Stirnnaht auf Walz- und geschweißten Trägern mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-2/NA [94]

Figure 6-134: Cover plates on beams and plate girders with reinforced transverse weld and fatigue classes according to DIN EN 1993-2/NA [94]

Alle beschriebenen, optimierten Varianten der Gurtlamelle haben gemein, dass exakt für diese Ausführung keine experimentellen Daten zur Kerbfalleinstufung vorliegen und sie damit nicht experimentell abgesichert werden können.

Dagegen wird im Rahmen dieser Forschungstätigkeit eine weiter optimierte Ausführungsvariante des Konstruktionsdetails Gurtlamelle vorgestellt. Experimentelle und numerische Untersuchungen führen zu einer höheren Kerbfalleinstufung im Vergleich zu den bisherigen Varianten. Die Forschungsergebnisse sind in Kapitel 7 beschrieben.

6.5.4 Schubbeanspruchte Kehlnähte

Shear-stressed fillet welds

Dieser Kategorie werden Konstruktionsdetails zugeordnet, bei welchen infolge veränderlicher Schubbeanspruchung in Schweißnahtlängsrichtung ein maßgebendes Ermüdungsversagen in der Schweißnaht auftritt. Wohingegen bei fast allen anderen Kerbdetails die Beanspruchung orthogonal zum auftretenden Ermüdungsriss (Modus I) dominiert, wirkt die maßgebende Schubbeanspruchung bei diesen Kerbdetails parallel zu den Rissflanken (Modus II und/oder Modus III). Generell kann bei experimentell abgeleiteten Wöhlerlinien, bei welchen die Schubbeanspruchung als maßgebend angenommen wird, eine flachere Neigung festgestellt werden [92]. Auch DIN EN 1993-1-9 [1] berücksichtigt für diese Kerbdetails eine flachere Neigung der Bemessungswöhlerlinie. Bei den Kerbdetails 8 und 9 (Bild 6-135) unterscheidet sich der Kerbfall 80 durch die Neigung $m = 5$ und außerdem durch den späteren Abknickpunkt bei 100 Mio. Schwingspielen. Die Kerbdetails 8 und 9 sind zudem nach DIN EN 1993-1-9 [1] auf Kehlnähte beschränkt.

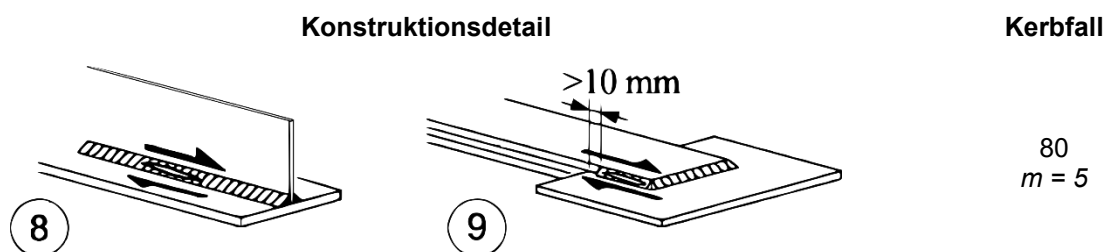


Bild 6-135: Schubbeanspruchte Kehlnähte und Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-135: Shear-stressed fillet welds with fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

6.5.4.1 Auswertung der verfügbaren Versuchsdaten zu Kerbdetail 8 / 9

Evaluation of available test results for detail 8 / 9

Ein typischer Anwendungsfall des Kerbdetails 8 sind die längsverlaufenden Halskehlnähte an geschweißten I-Trägern, mit welchen die einzelnen Flachhalbzeuge miteinander verbunden werden. Unter Biegebeanspruchung tragen diese Längsnähte hauptsächlich zur Schubübertragung zwischen Trägersteg und- flansch bei. Bei diesen Bauteilen kann jedoch eine reine einaxiale Schubbeanspruchung unter Biegung auch im Auflagerbereich nicht beobachtet werden. Daher lässt sich eine ausschließlich nach Kerbdetail 8 wirkende Schubbeanspruchung versuchstechnisch, bspw. im 4-Punkt-Biegeversuch, an realitätsnahen Großbauteilprobekörpern nur schwierig umsetzen. Für reine einaxiale Schubbeanspruchung der Halskehlnähte können aus diesbezüglichen Versuchsergebnissen keine eindeutigen Ermüdungskennwerte abgeleitet werden.



Bild 6-136: Geschweißter I-Träger mit Ermüdungsriss infolge Schubbeanspruchung der längsverlaufenden Kehlnähte [#297]

Figure 6-136: Welded I-beam with fatigue crack due to shear stress of the longitudinal fillet welds [#297]

Eine praktikable und zugleich konservative Vorgehensweise, diese Versuchsdaten dennoch in die statistische Auswertung miteinzubeziehen, ist es, die zusätzlich in den Längsschweißnähten auftretenden Normallängsspannungen auf der Widerstandsseite zu vernachlässigen. Die Voraussetzung hierfür ist ein dem Modus II bzw. Modus III entsprechendes Versagensbild (Bild 6-136), sowie lediglich moderat auftretende Normalspannungen in diesem Bereich. Durch diese Einschränkungen können jedoch nur wenige Biegeversuche an geschweißten I-Trägern für die Kerbfallableitung herangezogen werden, weshalb bereits in der Vergangenheit ein Ersatzprobekörpertyp entwickelt wurde. Dieser besteht aus einem Kreishohlprofil mit beidseitigen Stirnplatten, welche mit umlaufenden Kehlnähten angeschweißt werden. Der Versuchsaufbau sieht eine reine Torsionsbelastung der Kreishohlprofile vor, die zu einer einaxialen Schubbeanspruchung in Schweißnahtlängsrichtung der Kehlnähte führt.

Wie bereits im Abschnitt zu Kerbdetail 4 und 5 beschrieben, sind für die überlappende Laschenverbindung und der konkreten Ausführungsvariante nach DIN EN 1993-1-9 [1] (Kerbdetail 9) keine Versuchsdaten vorhanden. Ein Schubversagen der Kehlnähte für dieses Konstruktionsdetail kann daher nicht gesondert experimentell abgesichert werden.

Da für die Zuordnung von Einzelversuchsdaten zu Kerbdetail 8 bereits rudimentäre Filterkriterien verwendet werden, ergibt sich eine verbleibende vorgefilterte Datenbasis (Bild 6-137), welche direkt für die statistische Auswertung herangezogen werden kann. Zu diesen Filterkriterien gehören:

- Schubversagen ausschließlich an Kehlnahtschweißungen
- Keine Schweißnahtnachbehandlung oder nachträgliche Wärmebehandlung

- Ort der Spannungsermittlung (hier: Schweißnahtquerschnitt) muss bekannt sein
- Versuchsdaten ausschließlich aus Primärquellen

Bei der Darstellung in Bild 6-137 wird zwischen den beiden genannten Probekörpertypen unterschieden. Eine statistische Gesamtauswertung aller gefilterten Einzelversuchsdaten ergibt für eine feste Neigung von $m = 5$ einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\tau_c = 100 \text{ N/mm}^2$ und liegt damit zwei Kerbfälle über der gegenwärtigen Kerbfalleinstufung 80 nach DIN EN 1993-1-9 [1].

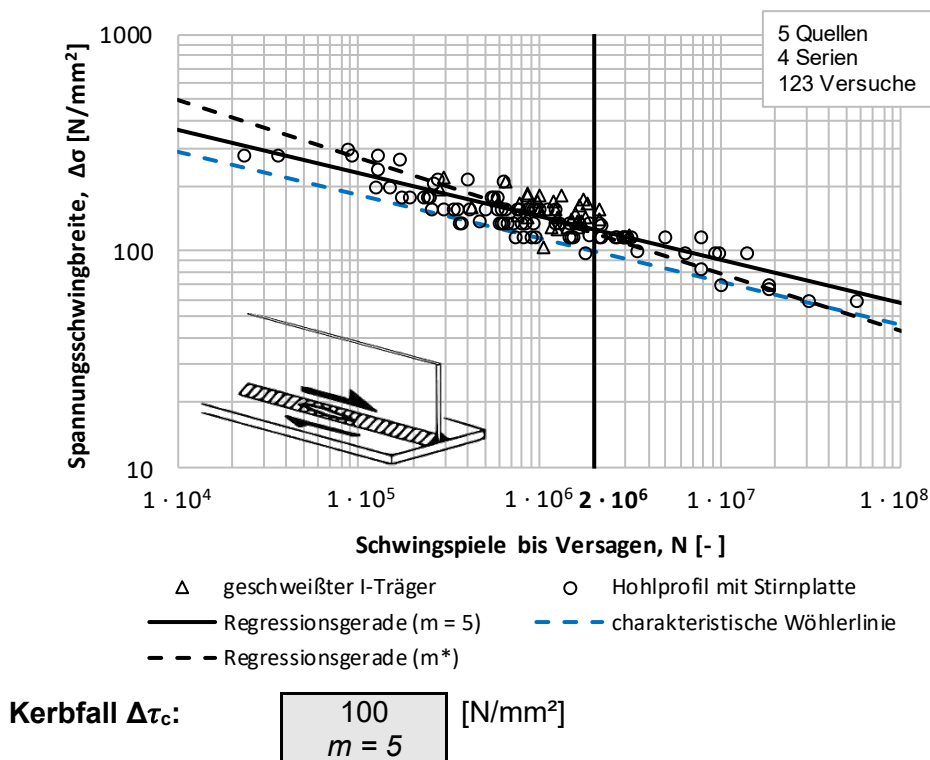


Bild 6-137: Darstellung aller vorgefilterten Einzelversuchsdaten zu schubbeanspruchten Kehlnähten (wie geschweißt) [Quellen IDs: #86, #297, #298, #394, #395]

Figure 6-137: Figure of prefiltered fatigue test data for shear-stressed fillet welds (as welded)

6.5.4.2 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite – Kerbdetail 8

Significant influence parameters on the resistance side – Detail 8

Eine Auswahl von möglichen Einflussgrößen auf die Kerbfalleitung der schubbeanspruchten Kehlnähte soll an dieser Stelle unter Berücksichtigung der vorhandenen Datenbasis diskutiert werden.

Mittelspannungsabhängigkeit

Während alle geschweißten I-Träger im Zugschwellbereich ($R = 0,1$) geprüft wurden, wurde ein Großteil der Versuche am Ersatzprobekörpertyp, also dem auf Torsion beanspruchten Kreishohlprofil mit Stirnplatten, bei einem Schubspannungsverhältnis von $R = -1,0$ durchgeführt.

Nach aktuellem Kenntnisstand wird davon ausgegangen, dass infolge Schubbeanspruchung (Modus II und/oder Modus III) versagende Kerbdetails keine bzw. eine deutlich geringere Mittelspannungsabhängigkeit als im Modus I versagende Kerbdetails aufweisen [92]. Um die Datenbasis nicht zu sehr einzugrenzen, werden in Bild 6-137 auch die Ver-

suche unter Wechselbeanspruchung berücksichtigt. Eine konkrete Mittelspannungsunabhängigkeit kann anhand der Versuchsbasis jedoch nicht abgeleitet werden, da innerhalb der einzelnen Versuchsserien die Mittelspannung nicht variiert wurde und die einzelnen Serien sich untereinander zu sehr unterscheiden.

Diskrepanz zwischen Ist- und Soll-Nahtdicke

Die Versuche der Datensammlung an geschweißten I-Trägern stammen alle aus einer Forschungsreinrichtung [#297, #298] und wurden bereits 1962 in Japan durchgeführt. Dabei wurden die Schweißverfahren Lichtbogenhand- und Unterpulverschweißen nach dem damaligen Stand der Technik verwendet. Bei Betrachtung der einzelnen Versuchsserien fällt auf, dass die UP-geschweißten Probekörper erneut eine deutlich höhere Ermüdungsfestigkeit als die lichtbogenhandgeschweißten Proben aufzeigen.

Als möglicherer Erklärungsansatz kann hier wieder die Diskrepanz zwischen Ist- und Soll-Nahtdicke unter Berücksichtigung des tiefen Einbrands beim UP-Schweißen angeführt werden. Insbesondere der tiefe Einbrand der UP-Schweißungen, welche prozessbedingt i. d. R. in der Größenordnung von mehreren Millimetern liegt, wurde nicht dokumentiert und auch entsprechend der Angaben in der Primärquelle bei der Bestimmung des Schweißnahtquerschnitts nicht berücksichtigt. Tendenziell fällt die dadurch abgeleitete Kerbfalleinstufung höher bzw. auf der unsicheren Seite liegend aus.

Interaktion von Längs- und Schubspannungen

Beispielsweise beim biegebeanspruchten, geschweißten I-Träger treten in den schubbeanspruchten Halskehlnähten gleichzeitig („in Phase“) auch Längsnormalspannungen auf. Bei anderen Anwendungsfällen können diese auch „phasenversetzt“ auftreten. Dadurch kann sowohl die Lebenszeit als auch der maßgebende Versagensbereich variieren und der Komplexitätsgrad der Lebensdauerabschätzung ansteigen [95].

Für den mehraxialen Beanspruchungszustand fordert die DIN EN 1993-1-9 [1] einen zusätzlich Interaktionsnachweis (6-1) auf Grundlage der Palmgren-Miner-Regel, dessen zulässige Schadenssumme mit 1,0 sich von anderen Richtlinien, wie den IIW-Empfehlungen [16] mit 0,5, deutlich unterscheidet.

$$\left(\frac{Y_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / Y_{Mf}}\right)^3 + \left(\frac{Y_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / Y_{Mf}}\right)^5 \leq 1,0 \quad (6-1)$$

Eine Änderung der Kerbfalleinstufung des Kerbdetails 8 muss daher auch unter dem Gesichtspunkt der Beeinflussung des Interaktionsnachweises bewertet werden. Eine weitreichende Abschätzung des Einflusses von kombinierte Beanspruchungen ist jedoch anhand der gegenwärtig vorhandenen Datenbasis nicht möglich. Sollte diese Problemstellung zukünftig weiterverfolgt werden, müsste eine Erweiterung der Datenbankstruktur zur Erfassung von mehraxialen Spannungszuständen und deren Phasenbeziehungen in Betracht gezogen werden.

6.5.5 Kopfbolzendübel in Verbundwirkung unter Schubbeanspruchung

Welded stud in composite application under shear stress

Den infolge wechselnder Schubbeanspruchung versagenden Konstruktionsdetails kann auch Kerbdetail 10, der Kopfbolzendübel in Verbundwirkung, zugeordnet werden. Der Kopfbolzendübel dient als Verbindungsmittel zwischen den beiden Verbundpartnern Stahlprofil und Betonbauteil. Durch die unterschiedlichen Werkstoffe Stahl und Beton ergeben sich komplexe Beanspruchungszustände der Verbindungsmittel, weshalb die Anwendung des Kerbdetails 10 auf den Stahlverbundbau begrenzt ist. Für die Nachweisführung, auch unter Ermüdung, wird auf die EN 1994-2 [96] verwiesen. Die Kerbfalleinstufung mit Kerbfall 90 und $m = 8$ ist nach DIN EN 1993-1-9 [1] (Bild 6-138) und EN 1994-2 [96] gleich. Die deutlich flachere Neigung der Bemessungswöhlerlinie, welche sich auch mit experimentellen Versuchsdaten deckt (siehe bspw. [#75]), deutet auf eine geringere Kerbschärfe im Vergleich zu anderen Kerbdetails hin. Um die Lebenszeit für hohe Schwingspielzahlen nicht zu überschätzen wird nach DIN EN 1993-1-9 [1] kein horizontaler Abknickpunkt bei bspw. 5 Mio. Schwingspielen festgelegt bzw. kein Dauerfestigkeitsbereich vorgegeben.

Durch die maßgebende Schubbeanspruchung grenzt sich das Kerbdetail 10 eindeutig zu Kerbdetail 9 aus Tabelle 8.4 ab, bei welchem der Kopfbolzendübel als Anbauteil zu verstehen ist und die maßgebende Beanspruchung im darunterliegenden Stahlhalbzeug, bspw. im Trägerflansch, wirkt.

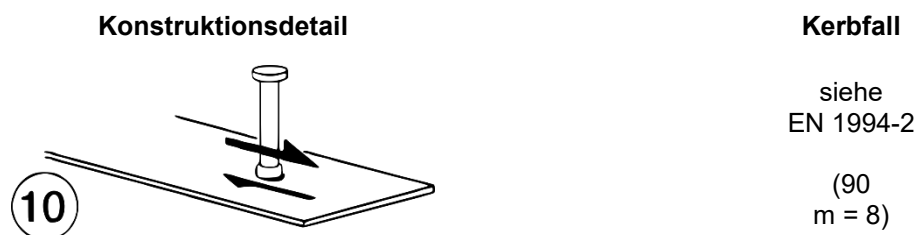


Bild 6-138: Kopfbolzendübel in Verbundwirkung und Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-138: Welded stud in composite application with fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

6.5.5.1 Verfügbare Versuchsdaten zu Kerbdetail 10

6.5.5.2 Available test data for detail 10

In Bild 6-139 sind alle in der Datenbank vorhandenen Einzelversuchsdaten zu Kerbdetail 10 dargestellt.

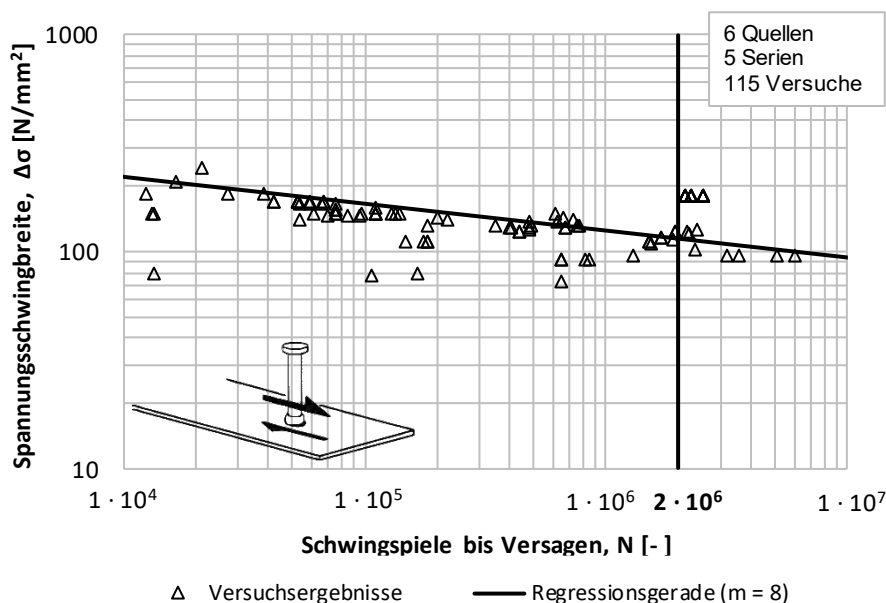


Bild 6-139: Darstellung aller Einzelversuchsdaten zum Kerbdetail 10 – Kopfbolzen in Verbundwirkung unter Schubbeanspruchung [Quellen IDs: #75, #124, #131, #291, #292, #1003]

Figure 6-139: Experimental fatigue test data for construction detail 10 – welded stud shear connector in composite application

Die gegenwärtige Datenbasis beinhaltet ausschließlich Push-Out-Versuche. Der Push-Out-Versuch ist ein Abscherversuch am Ersatzprobekörper, welcher nach DIN EN 1994-2 [96] im Stahlverbundbau zur Bestimmung des Ermüdungswiderstands von Verbundmitteln verwendet werden darf. Versuchsdaten aus Großbauteilversuchen, bspw. aus Biegeversuchen an Stahlverbundträgern, sind aktuell nicht erfasst. Dies hängt unter anderem mit den komplexen Mechanismen bei der Lastabtragung des Schubverbunds zusammen, wodurch die Beanspruchung der einzelnen Kopfbolzendübel sich versuchstechnisch nur schwierig erfassen lässt. Zudem kann es bei diesen Großbauteilversuchen infolge Lastumlagerungsvorgängen im Versuchsverlauf zu einer veränderlichen Schubspannungsschwingbreite in der betrachteten Kopfbolzenschweißung kommen. Eine Kerbfallableitung für konstante Spannungsschwingbreiten ist damit nicht ohne weitere Annahmen möglich.

6.5.5.3 Auswertung der verfügbaren experimentellen Versuchsdaten nach [#75]

Evaluation of available test results according to [#75]

Zur Zusammenstellung, Auswahl und statistischer Auswertung von Push-Out-Versuchen gibt es bereits umfangreiche Veröffentlichungen. In [#75] sind einige Versuchsserien aus unterschiedlichen Primärquellen, welche alle in der Datenbank erfasst sind, zusammengestellt und nachvollziehbar gefiltert. Bild 6-140 zeigt diese Zusammenstellung nach folgenden Filterkriterien:

- Kopfbolzenverbindung im Geltungsbereich der DIN EN 1994-2 [96]
- Alle Basisparameter müssen bekannt sein
- Kopfbolzendurchmesser: 19, 22 oder 25 mm
- Nur einaxiale Druckbeanspruchung im Beton
- Oberlasten im Ermüdungsversuch soll 60% der statischen Tragfähigkeit der Einzelbolzen nicht überschreiten
- Nur Beton mit einer Zylinderdruckfestigkeit von 20 – 40 N/mm²

- Nur horizontal betonierte Probekörper

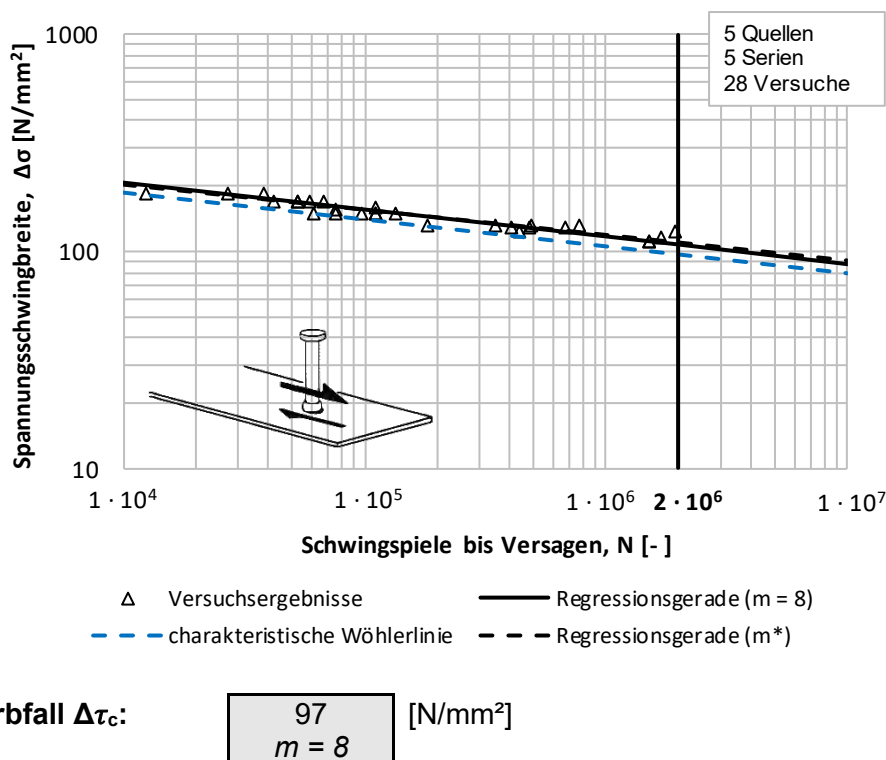


Bild 6-140: Darstellung und Auswertung der gefilterten Push-Out-Einzelversuchsdaten nach [#75]

Figure 6-140: Figure of filtered Push-Out fatigue test data and evaluation according to [#75]

Eine erneute statistische Auswertung, entsprechend der Vorgehensweise aus Kapitel 3, dieser gefilterten Datenbasis liefert für eine fest vorgegebene Neigung von $m = 8$ einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\tau_c = 97 \text{ N/mm}^2$ und bestätigt den aktuellen Kerbfall 90 nach DIN EN 1993-1-9 [1]. Dabei fällt die geringe Streuung der nach [#75] gefilterten Versuchsdaten auf.

Für die gegenwärtige Datenbasis können insbesondere die Mittelspannung und die Betondruckfestigkeit als maßgebende Einflussparameter auf die Ermüdungsfestigkeit der Kopfbolzenverbindung unter Schubbeanspruchung festgestellt werden. Für ein Spannungsverhältnis von $R = -1,0$ kann eine deutlich höhere und für $R > 0,5$ eine deutlich geringere Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Neuere Versuchsdaten für Kopfbolzenverbindungen in hochfestem Beton zeigen eine deutlich höhere Ermüdungsfestigkeit (vgl. [#1003]). Dies sollte weiterhin bei der Kerbfalleableitung des Kerbdetails 10 berücksichtigt werden.

6.5.6 Ringflanschanschlüsse

Tube socket joints

Tabelle 8.5 der DIN EN 1993-1-9 [1] beinhaltet außerdem zwei unterschiedliche Ausführungsvarianten (Bild 6-141) von Ringflanschanschlüssen. Das Kerbdetail 11 beschreibt eine Kreishohlprofil-Ringflanschverbindung mit mindestens 80 % durchgeschweißten Stumpfnähten und beschliffenem Schweißnahtübergang an der Außenseite, welche mit Kerbfall 71 eingestuft ist. Für die Variante nach Kerbdetail 12 ist keine Schweißnahtvorbereitung erforderlich. Die beiden Kehlnahtschweißungen werden ohne Schweißnaht-

nachbehandlung ausgeführt und in den Kerbfall 40 eingestuft. Bei beiden Ausführungsvarianten ist die Nennspannung im Rohrquerschnitt zu ermitteln und der maßgebende Ermüdungsriss soll nach DIN EN 1993-1-9 [1] (Bild 6-141) vom Schweißnahtübergang ausgehen.

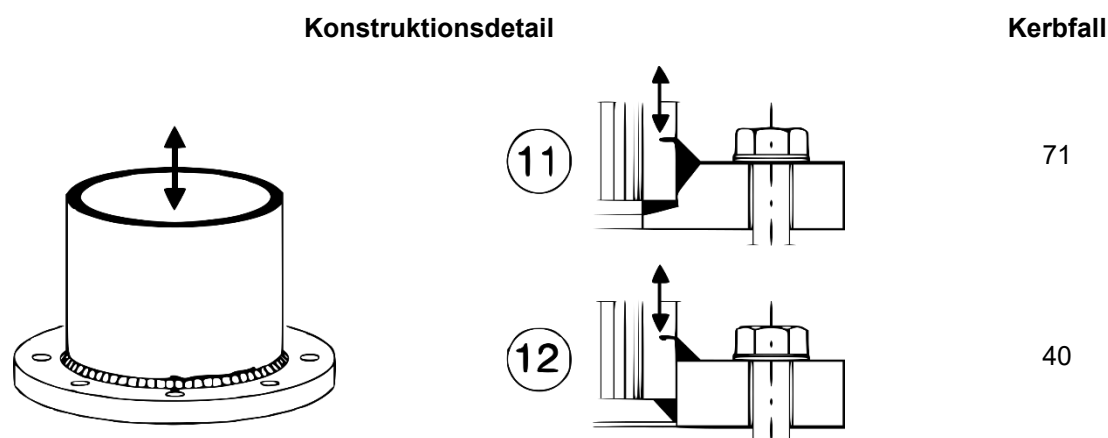


Bild 6-141: Ringflanschanschlüsse und Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-141: Tube socket joints with fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Gegenwärtig sind in der Datenbank keine Versuchsdaten zu den beiden Ringflanschanschlussvarianten erfasst. Auch im Hintergrunddokument zu DIN EN 1993-1-9 [4] sind keine Quellen oder Versuchsdaten gelistet. Dort ist lediglich ein Hinweis zu finden, dass die Kerbfälle aus den Empfehlungen der IIW [16] übernommen wurden und ursprünglich aus der Wasserkraftindustrie stammen.

Bei genauer Betrachtung der Einstufung nach IIW-Empfehlungen [16] fällt auf, dass das Kerbdetail 11 ohne Modifikation in den Kerbfall 71 übernommen wurde. Das Kerbdetail 12 hingegen ist mit einem Kerbfall 63 nach IIW-Empfehlungen [16] für ein Schweißnahtübergangsversagen zwei Kerbfallklassen höher eingestuft als nach DIN EN 1993-1-9 [1]. Zusätzlich muss nach IIW-Empfehlungen [16] aber bei der Variante nach Kerbfall 12 ein mögliches Schweißnahtwurzelsversagen separat nachgewiesen werden. In Abhängigkeit der Durchführung einer zerstörungsfreien Prüfung der Schweißnahtwurzel wird hierbei ein Kerbfall 50 (mit ZFP) bzw. ein Kerbfall 36 (ohne ZFP), bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt, vorgegeben. Nach DIN EN 1993-1-9 [1] gibt es keine Hinweise, ob ein Schweißnahtwurzelsversagen für Kerbdetail 12 gesondert nachgewiesen werden muss, oder ob der niedrigere Kerbfall 40 dies schon berücksichtigt. In diesem Fall wäre eine zusätzliche Angabe zur Schweißnaht, bspw. Nahtdicke in Abhängigkeit zur Wanddicke des Hohlprofils, erforderlich.

Zudem sei angemerkt, dass für verhältnismäßig dünn gewählte Ringflansche, welche eine geringe Steifigkeit aufweisen, eine Nachweisführung auf Basis des Strukturspannungskonzepts dem Nennspannungskonzept vorzuziehen ist. Dies deckt sich auch mit den Empfehlungen des IIW [16].

6.6 Hohlprofile – Tabelle 8.6

Hollow sections – Table 8.6

Tabelle 8.6 – „Hohlprofile“ (DIN EN 1993-1-9 [1]) beinhaltet Konstruktionsdetails, bei welchen zumindest ein Verbindungspartner aus einem Kreishohlprofil (kurz: KHP) oder Rechteckhohlprofil (kurz: RHP) besteht. Gegenwärtig ist die Anwendung von Tabelle 8.6, sofern für das einzelne Kerbdetail keine gesonderten Anforderungen gestellt werden, auf Hohlprofile mit Wanddicken von $t \leq 12,5$ mm beschränkt.

Weitere Hohlprofil-Konstruktionsdetails sind in Tabelle 8.7 – „Geschweißten Knoten an Fachwerkträgern“ zu finden (siehe 6.7).

6.6.1 Rohr-Blech-Anschlüsse

Tube-plate joints

Kerbdetail 1 und Kerbdetail 2 beschreiben zwei unterschiedliche geschweißte Verbindungsarten zwischen den Fügepartnern Rohr- und Blechhalbzeug. Hierbei dient das Blechhalbzeug häufig als Lasche zum einfachen Anschluss an die weitere Tragkonstruktion. Nach DIN EN 1993-1-9 [1] sind beide Varianten auf Kreishohl- bzw. Rohrprofile unter veränderlicher Beanspruchung beschränkt.

6.6.1.1 Rohr-Blech-Anschluss mit zusammengespresstem Endquerschnitt des Hohlprofils – Kerbdetail 1

Tube-plate joint – tubes flatted and butt welded – Detail 1

Für die Anschlussvariante nach Kerbdetail 1 wird das an das Blechhalbzeug anzuschließende Hohlprofilende zusammengespresst, also plastisch verformt, sodass sich am Ende ein flacher Querschnitt einstellt. Für die anschließende beidseitige Stumpfnahtschweißung soll eine X-Nahtvorbereitung erfolgen. Kerbdetail 1 ist nach DIN EN 1993-1-9 [1] auf Rohrdurchmesser von $d < 200$ mm beschränkt und wird mit dem Kerbfall 71 bewertet (Bild 6-142).

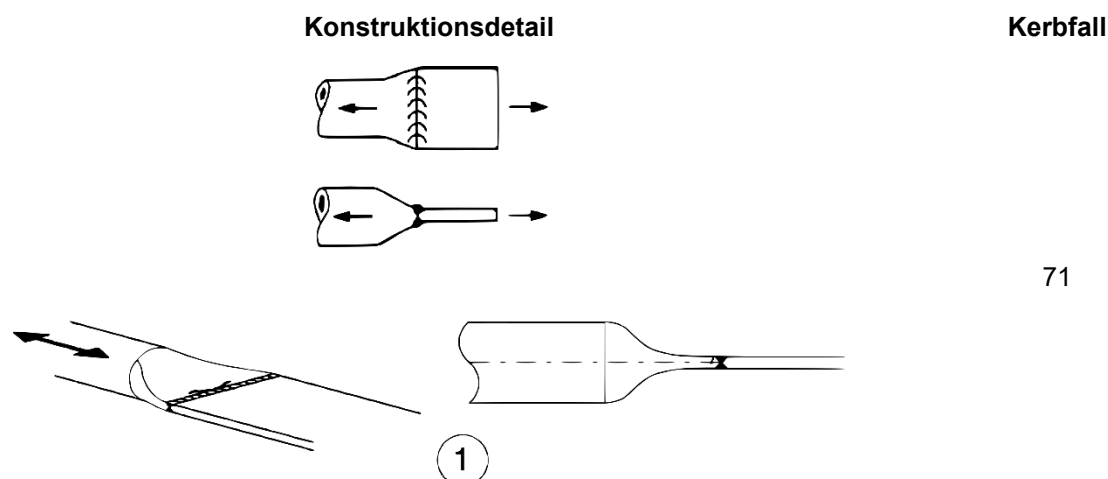
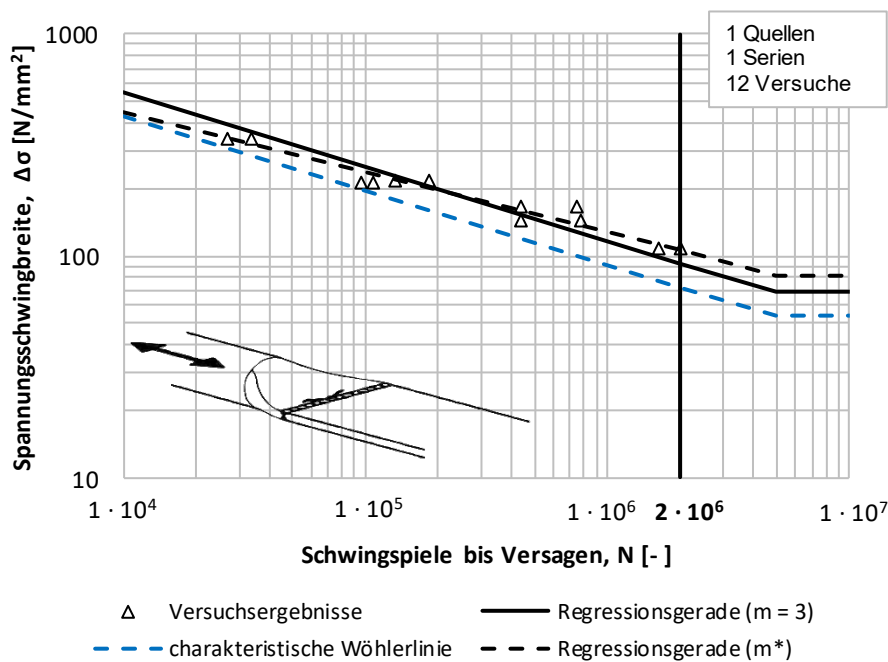


Bild 6-142: Rohr-Blech-Anschluss mit zusammengespresstem Endquerschnitt und Stumpfnahtausführung mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-142: Tube-plate joint, tubes flatted and butt welded with fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Die sich aus 12 Einzelversuchen zusammensetzende Versuchsdatenbasis (Bild 6-143) zu Kerbdetail 1 ist auf die Forschungstätigkeit von Zirn [#43] in den 1970er-Jahren zurückzuführen. Hierbei untersuchte Zirn neben unterschiedlichen Hohlprofilanschlüssen auch diese Rohr-Blech-Anschlussvariante. Zum Einsatz kamen ausschließlich Rohre mit einem Durchmesser von 88,9 mm und einer Wanddicke von 5,0 mm in den Stahlgüten St 37-2 und St 52-3. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass die Blechdicke der Lasche mit $t = 15$ mm 5 mm über der doppelten Rohrwanddicke eines vollständig zusammengepressten Rohres lag. Die Rohre waren also an den Enden nicht vollständig zusammengepresst und die eigentlich als X-Naht auszuführende beidseitige Stumpfnahwies auf der Rohrrinnenseite einen Wurzelspalt auf. Alle Versuche der Datenbasis wurden im Zustand „wie geschweißt“ im Zugschwellbereich ($R = 0,1$) geprüft.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 73 [N/mm²]

Bild 6-143: Alle Einzelversuchsdaten zum Rohr-Blech-Anschluss mit zusammengepresstem Endquerschnitt und statistische Auswertung (Kerbdetail 1) [Quellen ID: #43]

Figure 6-143: Experimental fatigue test data and evaluation for construction detail 1 – Tube-plate joint, tubes flattened

Die statistische Auswertung der 12 Einzelversuche ergibt für eine feste Neigung von $m = 3$ einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 73$ N/mm² und bestätigt damit den Kerbfall 71 nach DIN EN 1993-1-9 [1]. Mit der vorliegenden Datenbasis kann jedoch u. a. aufgrund der fehlenden Varianz an geprüften Rohrhälfteugen der Parameterbereich nach DIN EN 1993-1-9 [1] ($d < 200$ mm und $t \leq 12,5$ mm) nicht experimentell abgesichert werden. Besonders eine Rohrwanddicke von bis zu 12,5 mm erscheint infolge zu hoher lokaler plastischer Dehnungen beim Zusammenpressen des Rohrendes zu groß zu sein. Es fehlt daher ein Kriterium zur Einschränkung der lokalen plastischen Dehnung in Abhängigkeit der Bruchdehnung des verwendeten Rohrwerkstoffes. Für niederfeste Baustähle erscheint eine Begrenzung der Rohrwanddicke, welche deutlich unter 12,5 mm liegen müsste, ein praktikabler Ansatz zu sein.

6.6.1.2 Rohr-Blech-Anschluss mit geschlitztem Rohrende (Kerbdetail 2)

Tube-plate joint – tube slitted and welded to plate (detail 2)

Im Gegensatz zu Kerbdetail 1 muss das Rohrhälfte für Kerbdetail 2 nicht plastisch umgeformt werden. Bei diesem Konstruktionsdetail wird das Rohr am Ende längs eingeschlitzt, das Anschlussblech eingesteckt und mit Längsnähten stoffschlüssig mit dem Rohr verschweißt. Bei der Ausführungsvariante nach DIN EN 1993-1-9 [1] sind zudem an den Schlitzenden im Rohr Bohrungen vorzusehen. In Abhängigkeit des Ansträngungswinkels α wird nach DIN EN 1993-1-9 [1] ein Kerbfall 71 ($\alpha \leq 45^\circ$) bzw. Kerbfall 63 ($\alpha > 45^\circ$) vorgegeben (Bild 6-144). Dabei ist die Nennspannung auf den Rohrquerschnitt zu beziehen. Zusätzlich ist ein mögliches Schubversagen der Längsnähte nach Kerbdetail 8 aus Tabelle 8.5 (Abschnitt 6.5) nachzuweisen.

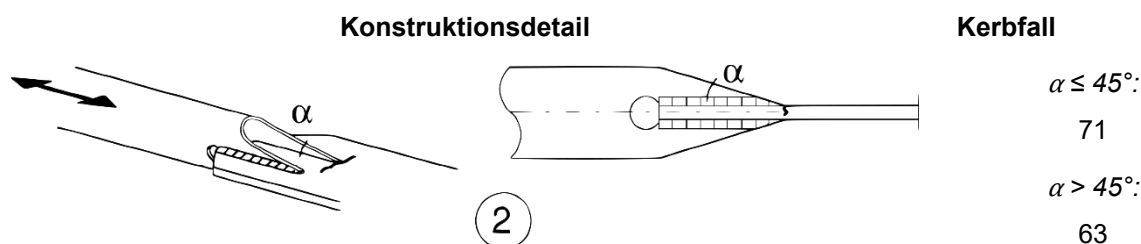


Bild 6-144: Rohr-Blech-Anschluss, Rohr geschlitzt und an das Blech geschweißt mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-144: Tube-plate joint, tube slitted and welded to plate with fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Obwohl einige Untersuchungen [#43, #295, #296, #1000] zur Ermüdungsfestigkeit von Rohr-Blech-Anschlüssen mit geschlitztem Rohrende bekannt sind, unterscheiden sich diese Ausführungsvarianten (Bild 6-125) entscheidend von der Variante nach DIN EN 1993-1-9 [1]. Bei diesen Untersuchungen wurde bspw. das Rohrende zusätzlich mit einem Deckel stirnseitig verschlossen oder die Form der Blechlaschen zur Reduktion des Steifigkeitssprungs am Schlitzende (vgl. IIW-Empfehlungen [16]) angepasst. Dadurch unterscheiden sich die Art der Schweißung und die lokal auftretenden Spannungskonzentrationen signifikant. Dies kann zu einer sich deutlich unterscheidenden Ermüdungsfestigkeit führen.

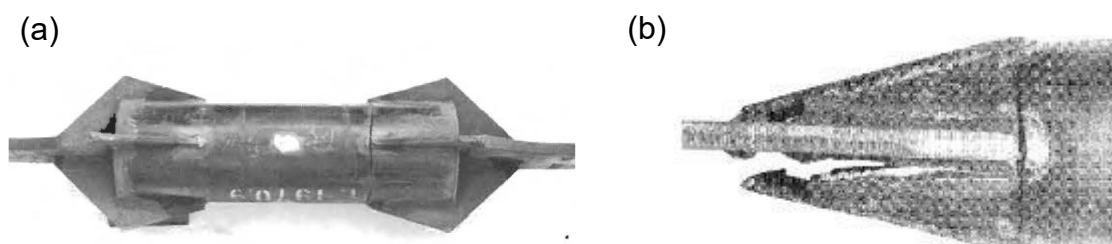


Bild 6-145: Verschiedene Ausführungsvarianten von Rohr-Blech-Anschlüssen mit geschlitzten Rohrenden – mit doppelter Blechlasche (a) [#88] und verschlossenem Rohrende (b) [#43]

Figure 6-145: Different types of tube-plate joints with slitted tube – with double plate (a) [#88] and closed tube end (b) [#43]

Zudem sind für das Konstruktionsdetail Rohr-Blech-Anschluss numerische Untersuchungen [97] auf Grundlage des Kerbspannungskonzepts bekannt. Hierbei wurde versucht, die bisherigen experimentellen Erkenntnisse auf die Ausführungsvariante nach DIN EN

1993-1-9 [1] und Rechteckhohlprofile zu übertragen. Da u. a. der Versagensort der experimentellen Probekörper und die Art der Schweißung sich signifikant unterscheiden, kann mit dieser Vorgehensweise jedoch keine eindeutige Kerbfallableitung erfolgen.

Bei weiterer Betrachtung des Konstruktionsdetails nach DIN EN 1993-1-9 [1] fällt auf, dass außerdem eindeutige Angaben zur Schweißnahtart fehlen, obwohl nach [#1000] an vergleichbaren Verbindungen unterschiedliche Ermüdungsfestigkeiten für Kehl- und HV-Nähte festgestellt wurden. Zudem fehlen Angaben zur Art und Weise der Umschweißung und einer eventuellen Schweißnahtnachbehandlung am Rohrende.

Für die Rohr-Blech-Anschlüsse besteht daher weiterhin ein hoher Bedarf an experimentellen und ergänzenden numerischen Untersuchungen. Hierzu kann auf das aktuelle Forschungsvorhaben [98] verwiesen werden.

6.6.2 Stumpfstöße von Hohlprofilen

Butt-welded end-to-end joints

Bei dieser Verbindungsart werden zwei Hohlprofile i. d. R. mit gleichen Nennabmessungen, stoffschlüssig miteinander gefügt. Die beiden Verbindungspartner liegen dabei in einer Ebene und die maßgebende Beanspruchung erfolgt in Profillängsrichtung. Unter veränderlicher Beanspruchung der einseitig ausgeführten Schweißung ist neben dem Schweißnahtübergang der Decklage auch der Schweißnahtwurzelbereich als ein potentieller Rissausgangsort zu nennen.

Bild 6-146 zeigt die aktuelle Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]. Dabei wird zwischen Kreishohlprofilen (Kerbfall 71) und Rechteckhohlprofilen (Kerbfall 56) unterschieden. Nach aktueller Normung dürfen ab einer Wanddicke von $t > 8$ mm die Stumpfstöße an Hohlprofilen zwei Kerbfälle höher eingestuft werden. Hierzu ist für die Decklage eine Nahtüberhöhung ≤ 10 % der Schweißnahtbreite und ein verlaufender Übergang ins Grundmaterial gefordert. Weiter soll die Schweißung nachweislich frei von erkennbaren Fehlern außerhalb der Toleranzen nach EN 1090-2 [99] sein und ist gegenwärtig auf Wannenlagenschweißungen beschränkt. Bei den Zeichnungen der Konstruktionsdetails nach DIN EN 1993-1-9 [1] (Bild 6-146) fällt auf, dass die Schweißnahtwurzel sehr flach und ein potentieller von dort ausgehender Riss nicht gekennzeichnet ist.

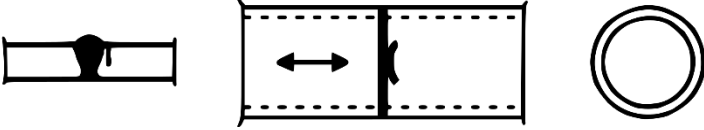
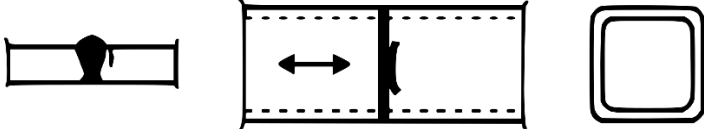
	Konstruktionsdetail	Kerbfall
③		$t \leq 8 \text{ mm}$: 71 $t > 8 \text{ mm}$: 90
④		$t \leq 8 \text{ mm}$: 56 $t > 8 \text{ mm}$: 71

Bild 6-146: Stöße an Hohlprofilen mit durchgeschweißten Stumpfnahten und Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-146: Butt-welded end-to-end joints between structural hollow sections and fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

6.6.2.1 Kreishohlprofile – Kerbdetail 3

Circular structural hollow sections – Detail 3

Alle Einzelversuchsdaten zum stumpfgestößenen Kreishohlprofil im Zustand „wie geschweißt“ sind in Bild 6-147 dargestellt.

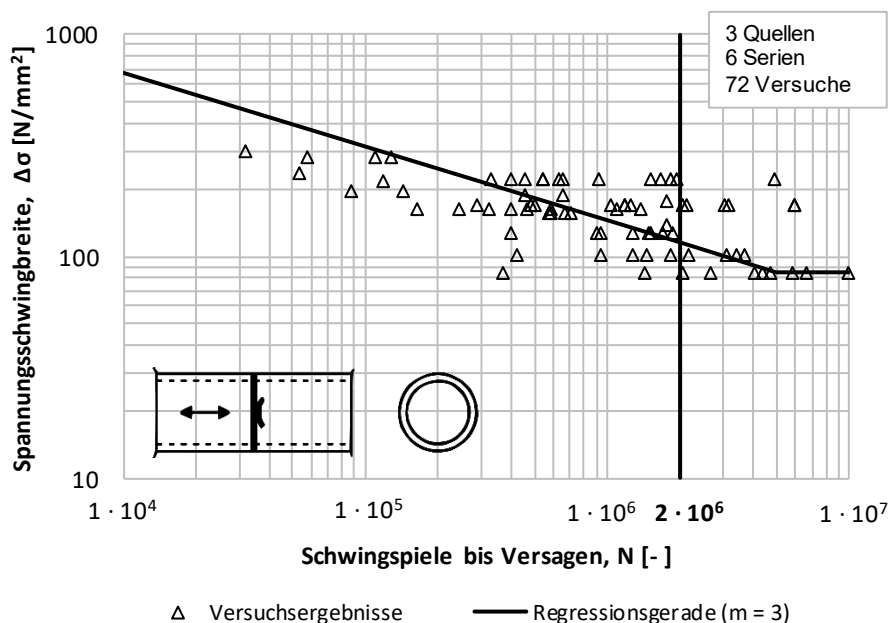


Bild 6-147: Darstellung aller Einzelversuchsdaten zum Kerbdetail 3 – Stumpfgestößene Kreishohlprofile (wie geschweißt) [Quellen ID: #1028]

Figure 6-147: Experimental fatigue test data for construction detail 3 butt-welded end-to-end joints between circular structural hollow sections (as welded)

Die aus 3 unterschiedlichen Quellen ungefiltert zusammengetragenen ca. 70 Einzelversuche weisen eine erhöhte Streuung auf. Dies ist mitunter damit zu begründen, dass Stumpfstoße mit unterschiedlicher Rohrwanddicke, Schweißungen mit Badsicherung und

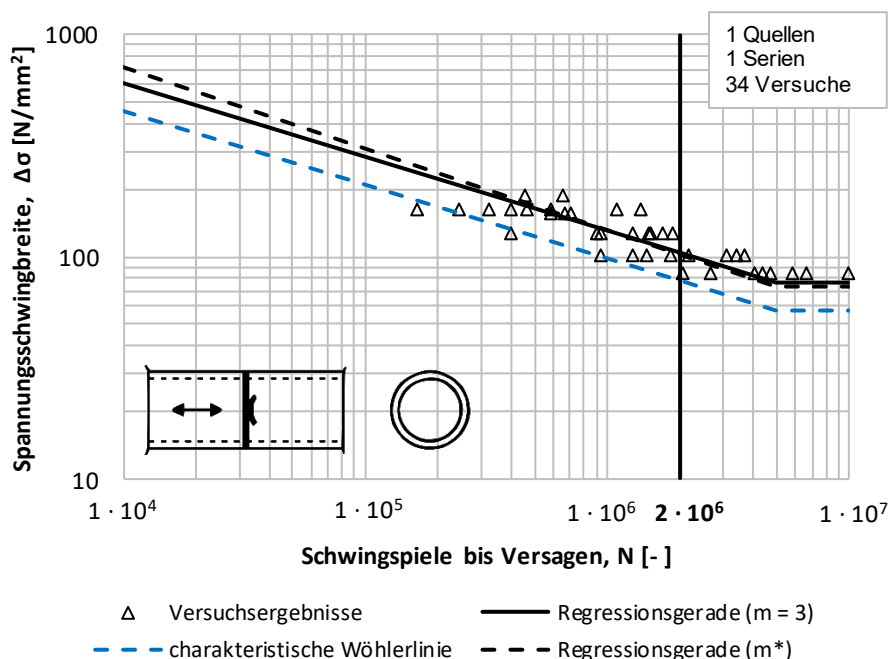
nicht voll durchgeschweißte Y-Nähte nicht ausgefiltert sind. Hinzu kommen weitere Einflüsse bspw. aufgrund der anspruchsvollen Schweißaufgabe (siehe Abschnitt: Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite).

Die zur Kerbfallableitung Bild 6-148 herangezogenen Versuchsdaten genügen folgenden Filterkriterien:

- Keine unterschiedlichen Nennabmessungen der Rohrwanddicke
- Nur einseitige, voll durchgeschweißte Stumpfnähte ohne Badsicherung
- Keine Schweißnahtnachbehandlung oder nachträgliche Wärmebehandlung
- Versuchsdaten ausschließlich aus Primärquellen
- Nur Versuche im Zugschwellbereich ($0,0 \leq R < 1,0$)

Alle Versuchsdaten der gefilterten Datenbasis (Bild 6-148) sind auf das FOSTA-Forschungsvorhaben P 816 [#1028] zurückzuführen. Die vorliegenden Daten decken Nennrohrdurchmesser zwischen 219,1 mm und 914,0 mm in den Nennwandungsdicken von 11,0 bis 43,6 mm ab. Die Rohrhälfte lagen in den Stahlgüten S355J2H, X70M und X75M vor. Probekörper mit einer Wanddicke von $t \leq 20$ mm wurden in Wannelage und Probekörper mit $t > 20$ mm in steigender Position gefügt. Alle Probekörper wurden unter Biegung im Zugschwellbereich ($0,1 \leq R \leq 0,2$) geprüft.

Eine statistische Auswertung der gefilterten Datenbasis (Bild 6-148) ergibt einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 78 \text{ N/mm}^2$. Da alle Probekörper im Wanddickenbereich von 11,0 bis 43,6 mm liegen, kann der gegenwärtig nach DIN EN 1993-1-9 [1] geltende Kerbfall 90 für Wanddicken $t > 8$ mm nicht bestätigt werden.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 78 [N/mm²]

Bild 6-148: Kerbfallableitung stumpfgestößer Kreishohlprofile (Kerbdetail 3) anhand gefilterter Versuchsergebnisse [Quellen ID: #1028]

Figure 6-148: Fatigue classification of butt-welded end-to-end joints between circular structural hollow sections (detail 3) based on filtered test results

6.6.2.2 Rechteckhohlprofile – Kerbdetail 4

Rectangular structural hollow sections – Detail 4

Bild 6-149 zeigt an zwei vergleichbaren einseitigen Stumpfnahtschweißungen, dass auch bei Rechteckhohlprofilen die versagensrelevante Rissinitiierung zwischen Schweißnahtwurzel und dem Schweißnahtübergang der Decklage variieren kann.

Dem Konstruktionsdetail „stumpfgestoßenes Rechteckhohlprofil“ können aus der Datenbasis ca. 70 Einzelversuche im Zustand „wie geschweißt“ aus vier unterschiedlichen Quellen zugeordnet werden. Alle vorliegenden Versuche wurden an Quadrathohlprofilen mit einer Profilhöhe von 100 mm und Wanddicken zwischen 4 und 8 mm durchgeführt. Die vorliegende Datensammlung erfüllt die grundlegenden Voraussetzungen um direkt für eine statistische Auswertung herangezogen werden zu können. Hierzu zählt das die Versuche ausschließlich aus Primärquellen entnommen wurden und alle im Zugschwellbereich ($R = 0,1$) geprüft wurden. Sofern an den Probekörpern Schweißnahtfehler, wie bspw. Wurzelbindefehler, festgestellt und dokumentiert wurden, werden diese Einzelversuchsdaten aussortiert.

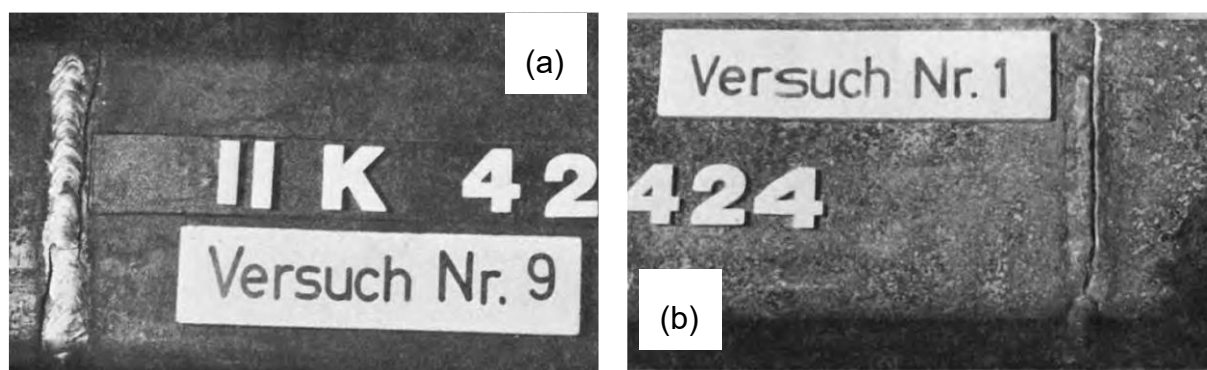
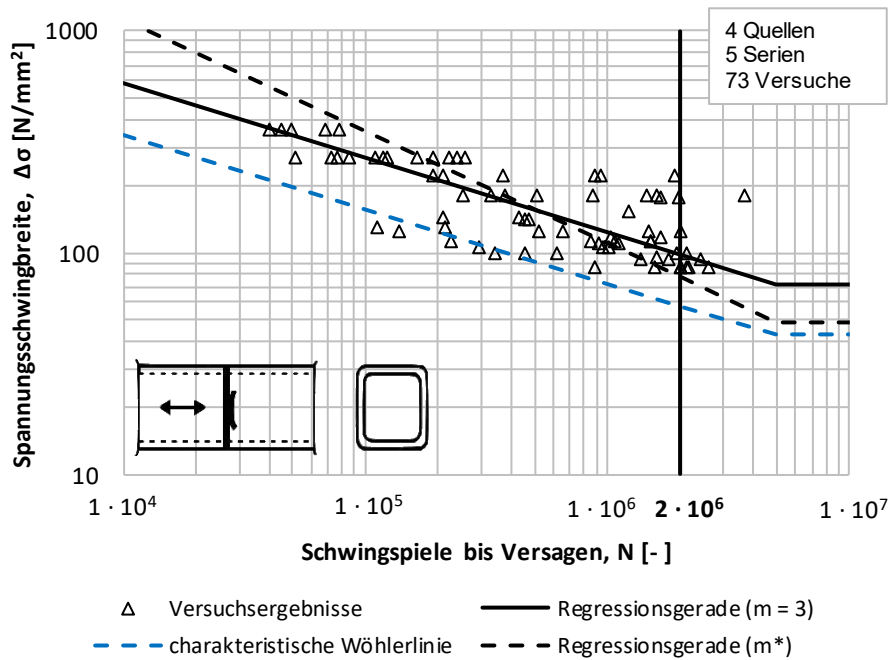


Bild 6-149: Stumpfgestoßene Rechteckhohlprofile mit Ermüdungsriß ausgehend vom Schweißnahtübergang der Decklage (a) sowie von der Schweißnahtwurzel (b) [#1011]

Figure 6-149: Butt-welded end-to-end joints between rectangular structural hollow sections with fatigue crack initiated at weld toe of the top bead (a) and root (b) [#1011]

Eine statistische Auswertung dieser Datenbasis (Bild 6-150) liefert einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 58 \text{ N/mm}^2$ und bestätigt damit den Kerbfall 56 nach DIN EN 1993-1-9 [1] für Wanddicken von $t \leq 8 \text{ mm}$. Für Wanddicken $t > 8 \text{ mm}$ liegen keine experimentellen Daten für stumpfgestoßene Rechteckhohlprofile vor. Die Hochstufung um zwei Kerbfallklassen für diesen Wanddickenbereich kann mit der experimentellen Datenbasis, auch für Rechteckhohlprofile, nicht abgesichert werden.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 58 [N/mm²]

Bild 6-150: Alle Einzelversuchsdaten und statistische Auswertung zu Kerbdetail 4 – Stöße an Rechteck-Hohlprofilen mit durchgeschweißten Stumpfnähten (wie geschweißt, Kerbdetail 4) [Quellen IDs: #47, #48, #1009, #1011]

Figure 6-150: Experimental fatigue test data and evaluation for construction detail 4 – Butt-welded end-to-end joints between rectangular structural hollow sections

6.6.2.3 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

Nachfolgend ist eine Auswahl von Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit der Kerbdetails 3 und 4 dargestellt, welche im Zusammenhang der Bearbeitung dieser Konstruktionsdetails hervorzuheben ist.

Schweißnahtqualität der einseitigen Stumpfnahtschweißung

Sowohl an Kreishohlprofilen als auch an Rechteckhohlprofilen ist die einseitige Stumpfnahtschweißung eine anspruchsvolle Schweißaufgabe. Die Anforderungen können in Abhängigkeit vom Hohlprofiltyp jedoch variieren. Bei Kreishohlprofilen ist die sich ständig ändernde Schweißposition, sofern keine Drehvorrichtung verwendet wird, zu nennen. Dagegen sind bei Rechteckhohlprofilen die Eckbereiche als besonders kritisch einzustufen. Da in der Praxis, entgegen zahlreicher Empfehlungen, in die Eckbereiche häufig Unterbrechungen der Stumpfnahtschweißung gelegt werden, führt dies dazu, dass hier vermehrt Schweißnahtunregelmäßigkeiten sowohl an der Innen- als auch Außenseite des Rechteckhohlprofils festgestellt werden.

Die Schweißnahtqualität dieser Konstruktionsdetails hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Durch Unterscheidung der Geltungsbereiche zwischen Blech- und Rohrhälfte wird bei der Schweißerprüfungen nach DIN EN ISO 9606-1 [100] versucht, das Schweißpersonal entsprechend der variierenden Schweißaufgabe zu schulen. Da die einseitige Stumpfnahtschweißung am Hohlprofil vermehrt zu Unregelmäßigkeiten an der

Schweißnahtwurzel, wie ungenügende Durchschweißung, Wurzelrückfall oder -durchhang neigt, ist der Umfang an erforderlichen ZFP-Untersuchungen eindeutig zu definieren. Nur durch eine funktionierende Qualitätskontrolle kann bei diesen anspruchsvollen Schweißaufgaben eine hohe Schweißnahtqualität sichergestellt werden. Weil meist eine Sichtprüfung der Schweißnahtwurzel an der Hohlprofilinnenseite nicht ohne Hilfsmittel durchgeführt werden kann, sind in diesem Fall gesonderte Anforderungen an ergänzende ZFP-Methoden erforderlich. Gegenwärtig sind die Anforderungen nach DIN EN 1993-1-9 [1] zu diesem Punkt nicht eindeutig und sollten daher konkretisiert werden.

Art der Beanspruchung

Für Kreishohlprofile liegen keine und für Rechteckhohlprofile nur wenige Versuchsdaten unter veränderlicher Axialbeanspruchung im Zugschwellbereich vor. Die wenigen Versuche zu stumpfgestoßenen RHP-Verbindungen unter axialer Beanspruchung weisen tendenziell eine geringere Lebensdauer auf. Diese Annahme ist nachvollziehbar, da unter Biegebeanspruchung in deutlich kleineren Bereichen die maximale Spannungsschwingbreite wirkt und damit die Wahrscheinlichkeit, in diesen Bereich zusätzlich versagensrelevante Unregelmäßigkeiten vorliegen, geringer ist. Dieser Erklärungsansatz kann jedoch anhand der geringen Anzahl an Axialversuchen, welche zudem nur aus einer Quelle [#48] stammen, nicht experimentell nachgewiesen werden. Eindeutige Rückschlüsse auf den Einfluss der Beanspruchungsart auf die Ermüdungsfestigkeit sind bei diesen Kerbdetails zu diesem Zeitpunkt daher nicht möglich.

Wanddicke

Sowohl für Kreishohlprofile als auch für Rechteckhohlprofile kann anhand der vorhandenen Datenbasis ein positiver Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit der Verbindung mit zunehmender Wanddicke nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die für die Kerbfallableitung der Kreishohlprofile herangezogene Datenbasis beinhaltet nur Versuche mit $t > 8$ mm und bestätigt dennoch nur den Kerbfall 71 und nicht den nach DIN EN 1993-1-9 [1] angegebenen Kerbfall 90. Für Rechteckhohlprofile liegen dagegen keine Versuchswerte für den Wanddickenbereich $t > 8$ mm vor. Eine Erhöhung um zwei Kerbfälle erscheint für die Wanddicken $t > 8$ mm auf Grundlage der gegenwärtigen Datenbasis zu einer Überschätzung der Lebensdauer der stumpfgestoßenen Verbindung zu führen.

6.6.3 Hohlprofil als Anbauteil – Kerbdetail 5

Hollow sections as welded attachments – Detail 5

Das Kerbdetail 5 beschreibt ein mit Kehlnähten an ein Hauptbauteil angeschweißtes Hohlprofil (Bild 6-151). Die für das Ermüdungsversagen maßgebende Beanspruchung wirkt nicht im Hohlprofil, sondern im Hauptbauteil. Das Konstruktionsdetail ist daher eng mit den „Angeschweißten Anschlüssen und Steifen“ aus Tabelle 8.4 nach DIN EN 1993-1-9 [1] verwandt. Im Gegensatz zur Längssteife ist der Querschnitt des Hohlprofils parallel zur Beanspruchungsrichtung auf $l \leq 100$ mm beschränkt und wird in den Kerbfall 71 eingestuft.

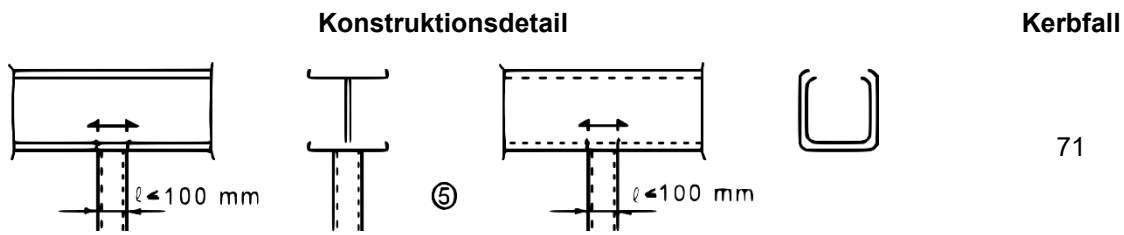


Bild 6-151: Mit Kehlnähten an ein anderes Bauteil angeschweißtes Hohlprofil mit Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-151: Structural hollow section, fillet-welded to another structural component with fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

6.6.3.1 Verfügbare Versuchsdaten zu Kerbdetail 5

Available test data for detail 5

Die aktuelle Datensammlung (Bild 6-152) zu Kerbdetail 5 umfasst 39 Einzelversuche aus 2 unterschiedlichen Quellen. Alle Versuchsdaten beziehen sich auf Hohlprofil-T-Knoten, bei welchen sowohl das durchgehende Gurtprofil (Hauptbauteil) als auch das Strebenprofil (Anbauteil) aus Kreis- oder Rechteckhohlprofilen bestehen. Die zumeist unter wechselnder Axialbelastung der Strebe geprüften Probekörper unterscheiden sich jedoch durch die Art der Beanspruchung und der Versagensform im Knotenbereich signifikant von Kerbdetail 5. Die mit axialer Strebenbeanspruchung geprüften Probekörper können daher für die Kerbfalleitung nicht herangezogen werden.

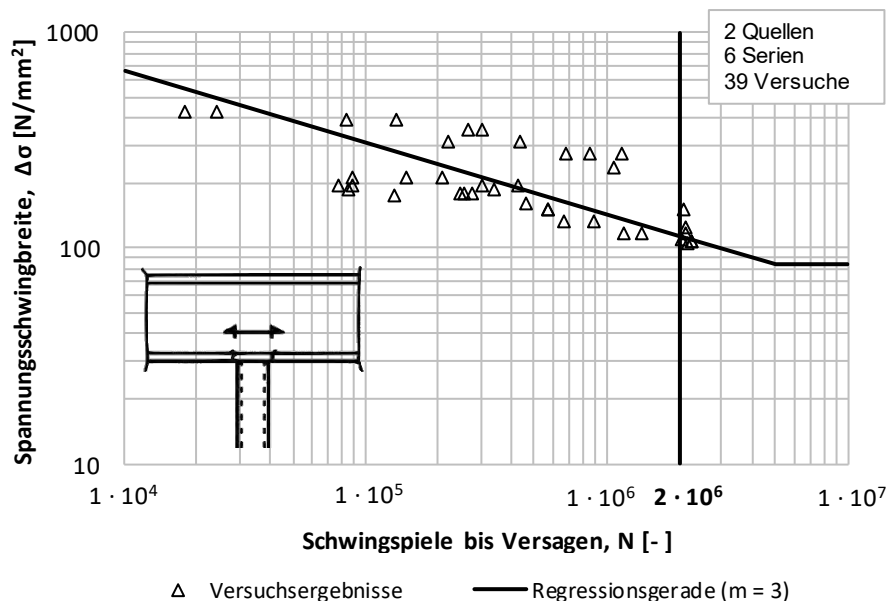


Bild 6-152: Darstellung aller Einzelversuchsdaten zum Kerbdetail 5 – Hohlprofil als Anbauteil [Quellen IDs: #41, #1031]

Figure 6-152: Experimental fatigue test data for construction detail 5 – structural hollow section as an attachment

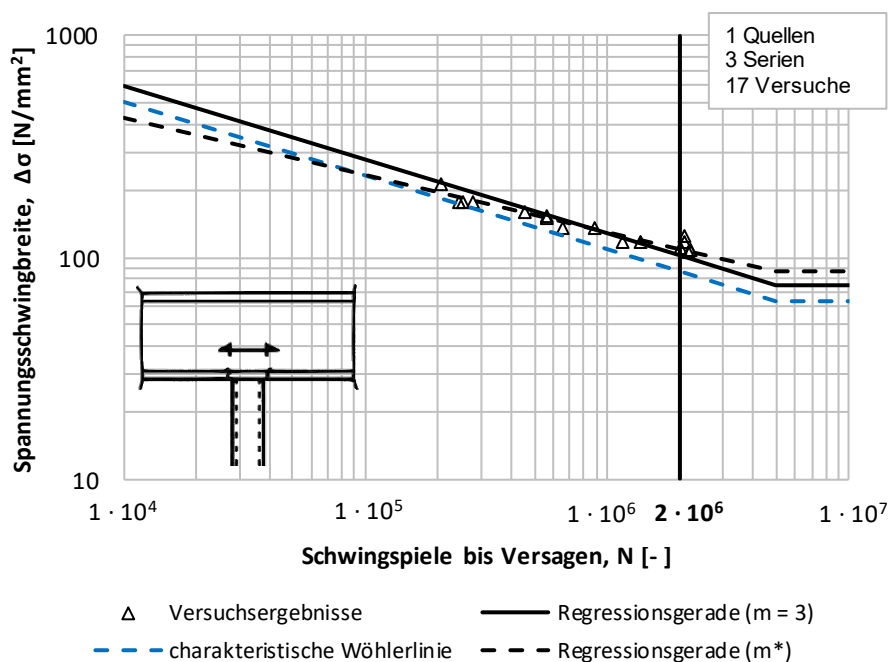
6.6.3.2 Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse – Kerbdetail 5

Evaluation of filtered test results – Detail 5

Für eine Kerbfalleitung des Kerbdetails 5 können nur Einzelversuchsdaten herangezogen werden, welche zumindest nachfolgende Filterkriterien erfüllen:

- Beanspruchung gemäß Kerbdetail 5 (bspw. Axial- oder Biegebeanspruchung des Hauptbauteils)
- Keine Schweißnahtnachbehandlung oder nachträgliche Wärmebehandlung
- Nur Versuche im Zugschwellbereich ($0,0 \leq R < 1,0$)

Die die gewählten Filterkriterien einhaltenden Versuchswerte sind in Bild 6-153 dargestellt. Eine statistische Auswertung dieser Daten ergibt einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit bei 2 Mio. Schwingspielen von $\Delta\sigma_c = 86 \text{ N/mm}^2$ und liegt damit über dem Kerbfall 71 nach DIN EN 1993-1-9 [1].



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 86 [N/mm²]

Bild 6-153: Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse – Hohlprofil als Anbauteil (Kerbdetail 5) [Quellen IDs: #1031]

Figure 6-153: Evaluation of filtered test results – structural hollow section as an attachment (detail 5)

Alle Versuchsdaten stammen jedoch aus einer Quelle, die nur auf eine Datensammlung von Hohlprofilverbindungen von Mang [#1031] zurückzuführen ist. Die zugehörigen Primärquellen sind nicht auffindbar. Folglich beinhaltet die aktuelle Datenbasis keine Einzelversuchsdaten aus Primärquellen.

Neben den fehlenden Informationen aus Primärquellen ist auch der begrenzte Einflussparameterbereich der durch die gegenwärtige Datenbasis abgedeckt wird kritisch zu bewerten. Bisher sind lediglich Daten für auf Hohlprofil-T-Knoten in der gefilterten Datenbasis vorhanden. Der Einfluss unterschiedlicher Stahlbauprofile als Hauptbauteile bspw. aufgrund variierender Steifigkeitsverteilungen im Querschnitt wird experimentell nicht abgedeckt. Außerdem sind aus der Sekundärquelle keinerlei Information zur Schweißfolge und -qualität bekannt. Besonders die Art der Umschweißung an der Stirnseite des Hohlprofils hat erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer des Konstruktionsdetails, was u. a. auch am Konstruktionsdetail Längssteife als signifikanten Einflussparameter auf die Ermüdungsfestigkeit identifiziert werden kann (Abschnitt 6.4).

6.6.4 Kopfplattenstöße von Hohlprofilen

End-to-end joints of structural hollow sections

Die Kerbdetails 6 bis 9 beschreiben je zwei unterschiedliche Ausführungsvarianten von Kopfplattenstößen von Kreishohl- bzw. Rechteckhohlprofilen. Grundsätzlich sind diese Kerbdetails eng mit den Kreuz- bzw. T-Stoßkerbdetails (vgl. Abschnitt 6.5) verwandt, grenzen sich aber u. a. durch die einseitige Schweißung und den konkreten Anwendungsfall ab.

Für die voll durchgeschweißten Varianten (Kerbdetail 6: KHP und Kerbdetail 7: RHP) wird nach DIN EN 1993-1-9 [1] ein Ermüdungsversagen ausgehend vom Schweißnahtübergang der Hohlprofilaußenseite angenommen. Diese Kerbdetails werden in den Kerbfall 50 (KHP) bzw. Kerbfall 45 (RHP) eingestuft (Bild 6-154). Für Wanddicken $t > 8$ mm darf das Konstruktionsdetail je einen Kerbfall höher eingestuft werden. Zudem müssen die einseitig voll durchgeschweißten Stumpfnähte nachweisbar frei von erkennbaren Fehlern außerhalb der Toleranzen nach EN 1090-2 [99] sein.

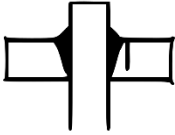
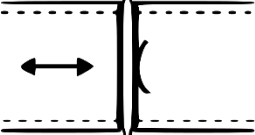
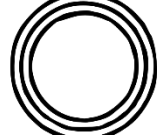
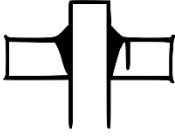
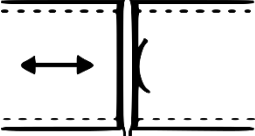
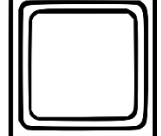
Konstruktionsdetail			Kerbfall
			$t \leq 8$ mm: 50
	⑥		$t > 8$ mm: 63
			$t \leq 8$ mm: 45
	⑦		$t > 8$ mm: 50

Bild 6-154: Kopfplattenstöße an Hohlprofilen mit durchgeschweißten HV-Nähten und Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-154: Structural hollow sections, butt-welded end-to-end joints with an intermediate plate and fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

Eine Schweißnahtvorbereitung an der Stirnseite der Hohlprofile ist für die Kehlnahtschweißungen nach Kerbdetail 8 und 9 nicht erforderlich. Nach DIN EN 1993-1-9 [1] sind diese Varianten auf Wanddicken $t \leq 8$ mm beschränkt und werden mit Kerbfall 40 (KHP) bzw. Kerbfall 36 (RHP) eingestuft (Bild 6-155). Im Gegensatz zu den Stumpfnahschweißungen (Kerbdetail 6 und Kerbdetail 7) existieren für diese Kerbdetails keine gesonderten Anforderungen hinsichtlich Toleranzen und Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Für die Varianten mit Kehlnahtschweißung wird grundsätzlich ein Schweißnahtwurzelversagen angenommen. Hierzu fehlen nach DIN EN 1993-1-9 [1] jedoch grundsätzliche Angaben, ob sich der Nennspannungsquerschnitt auf den Hohlprofil- oder den Schweißnahtquerschnitt bezieht.

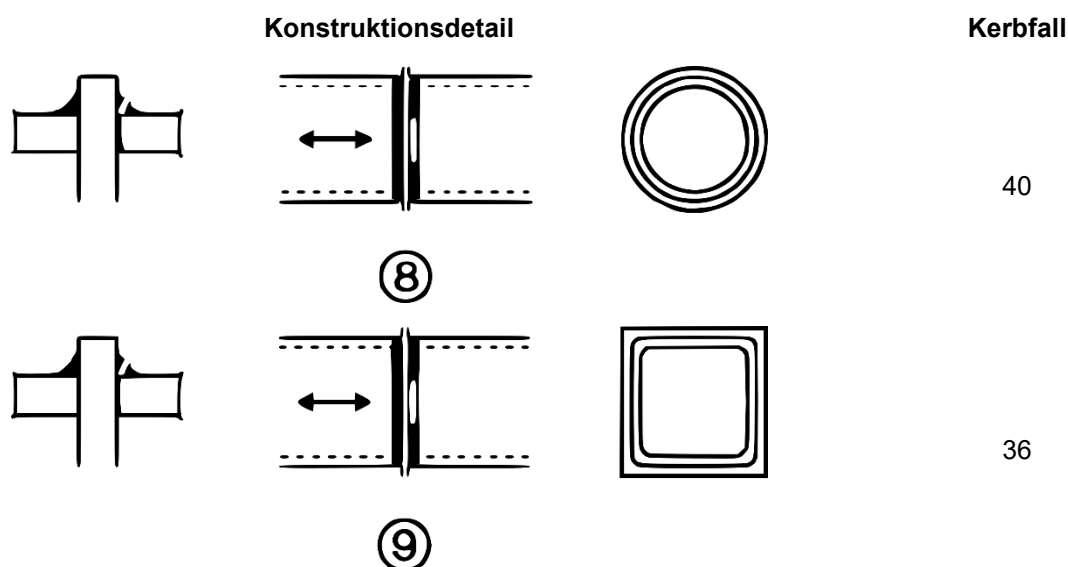


Bild 6-155: Kopfplattenstöße an Hohlprofilen mit Kehlnähten und Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1]

Figure 6-155: Structural hollow sections, fillet-welded end-to-end joints with an intermediate plate and fatigue classes according to DIN EN 1993-1-9 [1]

6.6.4.1 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available test data

Gegenwärtig sind in der Datenbank lediglich Versuchsdaten für Plattenstöße an Rechteckhohlprofilen mit Kehlnähten (Kerbdetail 9) vorhanden. Die ca. 70 Einzelversuche sind ausschließlich auf Forschungstätigkeiten in Deutschland und Belgien [#47, #48] zurückzuführen und wurden alle im Zustand „wie geschweißt“ geprüft.

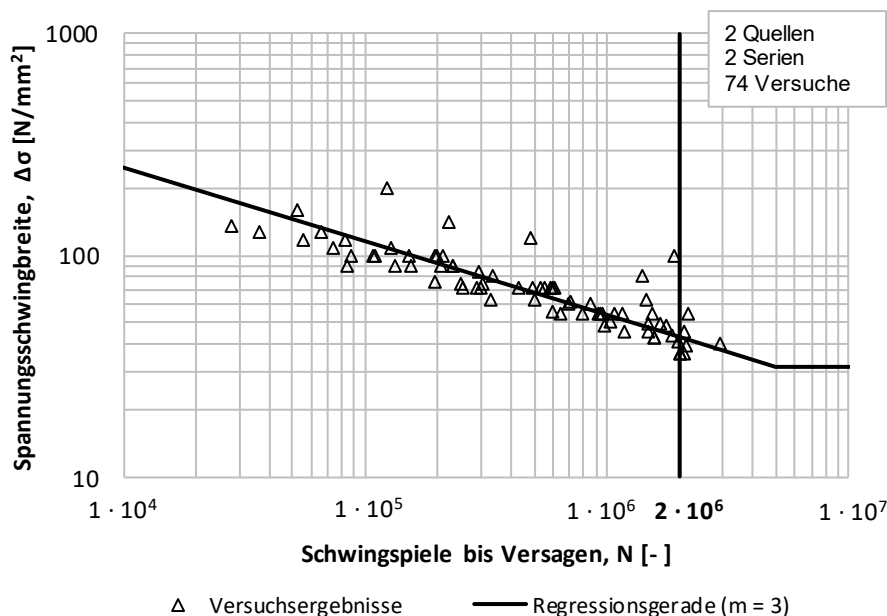


Bild 6-156: Darstellung aller Einzelversuchsdaten zum Kerbdetail 9 – Kopfplattenstoß von Rechteckhohlprofilen mit Kehlnähten (wie geschweißt) [Quellen IDs: #47, #48]

Figure 6-156: Experimental fatigue test data for construction detail 9 – rectangular hollow sections, fillet-welded end-to-end with an intermediate plate (as welded)

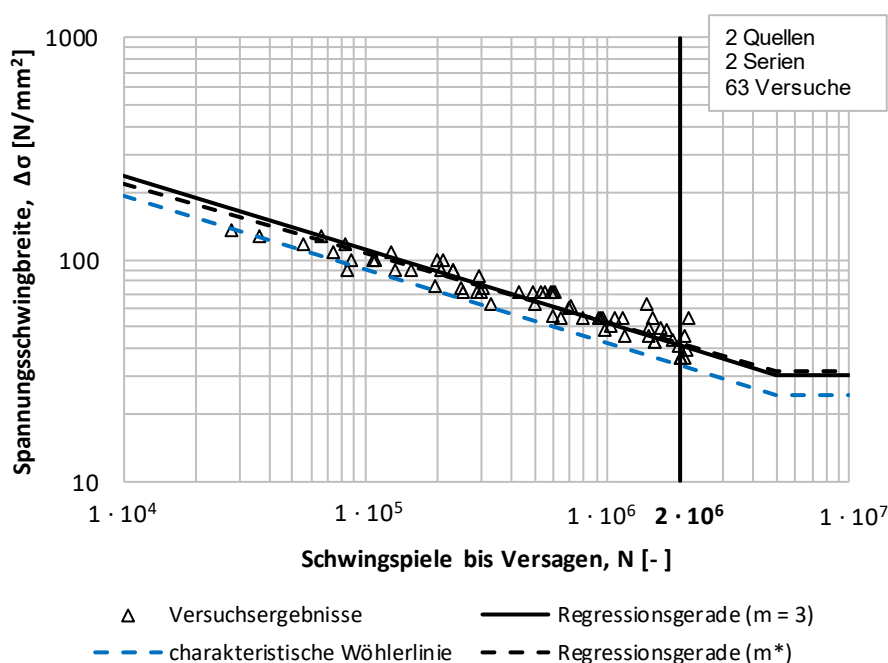
Für die Kerbdetails 6 bis 8 ist gegenwärtig keine experimentelle Datenbasis vorhanden. Die nach DIN EN 1993-1-9 [1] gewählte Kerbfalleinstufung kann daher gegenwärtig nicht experimentell abgesichert werden. Auch im Hintergrunddokument zur DIN EN 1993-1-9 [4] sind zur Kerbfalleinstufung dieser Kerbdetails keine weiteren Hinweise zu finden.

6.6.4.2 Auswertung der gefilterten Versuchsergebnisse – Kerbdetail 9

Evaluation of filtered test results – Detail 9

In Bild 6-157 ist die gefilterte Datenbasis der Kopfplattenstöße von Rechteckhohlprofilen mit Kehlnähten dargestellt. Bei der Auswahl werden nur die Einzelversuchswerte herangezogen, welche folgenden Filterkriterien genügen:

- Keine Schweißnahtnachbehandlung oder nachträgliche Wärmebehandlung
- Nur Probekörper mit innenliegender Blechkopfplatte, also bspw. keine Hohlprofil-X-Knoten mit innenliegendem Hohlprofil
- Versuchsdaten ausschließlich aus Primärquellen
- Nur Versuche im Zugschwellbereich ($0,0 \leq R < 1,0$)



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 33 [N/mm²]

Bild 6-157: Kerbfalleitung Kopfplattenstoß von Rechteckhohlprofilen mit Kehlnähten (Kerbdetail 9) anhand gefilterter Versuchsergebnisse [Quellen IDs: #47, #48]

Figure 6-157: Fatigue classification of fillet-welded end-to-end between rectangular hollow sections with an intermediate plate based on filtered test results

Da bei allen vorliegen Einzelversuchswerten die Nennwanddicken der Hohlprofile gleich den Soll-Nahtdicken gewählt wurden, können auch diejenigen Versuche für die statistische Auswertung herangezogen werden, für welche der Ort der Nennspannungsermittlung nicht eindeutig angegeben wurde. Die gefilterte Datenbasis enthält dadurch 63 Einzelversuche aus 2 unterschiedlichen Primärquellen. Die Querschnittsabmessungen liegen zwischen 80 und 100 mm für Wanddicken zwischen 4 und 8 mm. Die statistische Auswertung ergibt einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit von

$\Delta\sigma_c = 33 \text{ N/mm}^2$ und liegt damit unter dem niedrigsten Kerbfall 36 nach DIN EN 1993-1-9 [1].

6.6.4.3 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite – Kerbdetail 9

Significant influence parameters on the resistance side – Detail 9

Grundsätzlich gelten die in 6.5 zum Kreuzstoß mit Schweißnahtwurzelsversagen genannten Einflussgrößen auch für den Kopfplattenstoß mit Kehlnähten. Hierzu zählen u. a. die Diskrepanz zwischen Soll- und tatsächlicher Schweißnahtdicke, die Einbrandtiefe und die Art der Beanspruchung. Für den konkreten Anwendungsfall am Rechteckhohlprofil kann, in Bezug auf Einflussgrößen noch folgendes ergänzt werden:

Mittelspannungsabhängigkeit und Schweißnahteigenstressungen

Im Vergleich zu den Kleinteilprobekörpern der Kreuzstöße sind die Eigenspannungszustände im Bereich der Schweißnaht in den Hohlprofilprobekörpern als realitätsnah einzustufen. Dies hängt u. a. damit zusammen, dass bei den Hohlprofilprobekörpern im Anschluss an die Schweißung keine anschließende Ausarbeitung zu Kleinteilprobekörpern mehr erfolgt. Es ist davon auszugehen, dass die durch die Schweißung eingebrachten Eigenspannungen durch die Probenausarbeitung nicht abgebaut werden. Die vorliegende Datenbasis des Kerbdetails 9 deckt Spannungsverhältnisse von $-1,0 \leq R \leq 0,5$ ab und zeigt im Bereich $0,0 \leq R \leq 0,5$ keinen nennenswerten Einfluss von R auf die Ermüdungsfestigkeit der geprüften Probekörper.

Schweißnahtqualität

Als weiteren Erklärungsansatz für die geringe Kerbfalleinstufung der vorliegenden Versuchsdaten des Kerbdetails 9 ist die anspruchsvolle Schweißaufgabe bei Schweißungen an Hohlprofilen zu nennen. Insbesondere bei unzureichender Qualitätskontrolle kann die Schweißnahtqualität an den kritischen Stellen erheblich leiden. Bei den vorliegenden Rechteckhohlprofilen sind besonders die Eckbereiche, in die in der Praxis entgegen zahlreicher Empfehlungen häufig Schweißnahtunterbrechungen gelegt werden, als besonders kritisch einzustufen.

6.7 Geschweißte Knoten und Fachwerkträgern – Tabelle 8.7

Lattice girder node joints – Table 8.7

6.7.1 Übersicht und Hintergrund

Overview and background

Tabelle 8.7 der DIN EN 1993-1-9 [1] regelt die Kerbfälle geschweißter Knoten in Fachwerkträgern. Die Details enthalten K- und N-Knoten aus Rund- und Rechteckprofilen mit Spalt oder Überlappung der Diagonalen. Kerbfallklassen hängen dabei vom Wandstärkenverhältnis von Diagonale und Gurt ab.

Ferner gibt es aufgrund der komplexen Geometrie der Details zahlreiche Anforderungen an die Abmessungen, die zur Anwendung der Kerbfälle eingehalten werden müssen, siehe Tabelle 6-65.

Tabelle 6-65: Geometrieanforderungen an Rohrknoten in Tabelle 8.7 in DIN EN 1993-1-9

Table 6-65: Geometry requirements for hollow section joints in table 8.7 in DIN EN 1993-1-9

Alle Rohrknoten	
<ul style="list-style-type: none"> • Es sind getrennte Nachweise für Gurte und Diagonalen zu führen. • Bei Zwischenwerten von $\frac{t_0}{t_i}$ ist zwischen den Kerbgruppenlinear zu interpolieren. • Bei Diagonalen mit $t \leq 8$ mm sind Kehlnähte erlaubt. • Geometrieanforderungen: <ol style="list-style-type: none"> 1. t_0 und $t_i \leq 8$ mm 2. $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ 3. a. $\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ b. $\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ 4. a. $0,4 \leq \frac{b_i}{b_0} \leq 1$ b. $0,25 \leq \frac{d_i}{d_0} \leq 1$ 5. a. $b_0 \leq 200$ mm b. $d_0 \leq 300$ mm 6. a. $-0,5 h_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 h_0$ b. $-0,5 d_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 d_0$ 7. a. $e_{o/p} \leq 0,02 b_0$ b. $e_{o/p} \leq 0,02 d_0$ <p>[$e_{o/p}$: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene]</p> 	
Anschluss mit Spalt	Anschluss mit Überlappung
<ul style="list-style-type: none"> • Rechteckprofile: $0,5 (b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1 (b_0 - b_i)$ $g \geq 2 t_0$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $30\% \leq \text{Überlappung} \leq 100\%$ • $\text{Überlappung} = \frac{q}{p} \times 100\%$ • Definition von p und q:

Für alle Details aus Tabelle 8.7 konnte festgestellt werden, dass die meisten Ermüdungsversuche, auf denen die Kerbfallableitung beruht, überraschenderweise an Probekörpern durchgeführt wurde, die nicht allen Geometrieanforderungen genügen.

Tabelle 6-66 gibt einen Überblick für die Erfüllung der Geometrieanforderungen. Nur bei 8,6% der Serien genügen die Probekörper allen Geometrieanforderungen der DIN EN 1993-1-9 [1]. Besonders auffällig ist, dass die Bedingungen 3a: $\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ bzw. 3b: $\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ bei 64,7 % der Serien nicht eingehalten sind. Aus diesen Gründen wurden die Geometrieanforderungen mit jenen der Vorgängernormen und Normen aus verwandten Bereichen verglichen. Dabei fiel auf, dass in der Vornorm ENV 1993-1-1 [6] die gleichen Kerbfälle zu finden sind, mit abweichenden Geometrieanforderungen. Erstens waren die Dicken t_0 und t_i damals nur auf 12,5 mm beschränkt. Zudem existiert in der Vornorm die Bedingung $\frac{d_0}{t_0} \leq 25$ bzw. $\frac{b_0}{t_0} \leq 25$ ohne Multiplikation von $\frac{t_0}{t_i}$ auf der linken Seite. Diese Anforderung ist deutlich lockerer als die jetzige, denn $\frac{t_0}{t_i}$ ist immer gleich oder größer als 1 und kann auch Werte bis 2 oder höher annehmen. Die Krannorm DIN EN 13001-3-1 [18] beinhaltet im Übrigen ebenfalls die gleichen Kerbfälle wie der Eurocode, mit den damaligen Anforderungen aus der Vornorm [6].

Tabelle 6-66: Zusammenfassung der Erfüllung von Geometrieanforderungen

Table 6-66: Summary of the fulfilment of geometry requirements

Geometrieanforderungen	Anteil an Serien [%]
Alle erfüllt	8,6
Eine nicht erfüllt	39,5
Zwei nicht erfüllt	12,5
Drei nicht erfüllt	17,1
Vier nicht erfüllt	22,4
$\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ bzw. $\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ nicht erfüllt	64,7

Ferner konnte festgestellt werden, dass die kritische Bedingung $\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ bzw. $\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ und die Beschränkung der Dicken auf 8 mm erstmalig im CIDECT Design Guide von 2001 [101] zu finden ist. Dort wird sogar der Hinweis gegeben, dass diese neuen Beschränkungen auf Versuchsdaten basieren, auf die jedoch nicht verwiesen wird. Der Ursprung für die neue Version dieser Bedingung bleibt bislang unklar.

6.7.2 K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt – Detail 1

K and N circular structural hollow section joints with gap – Detail 1

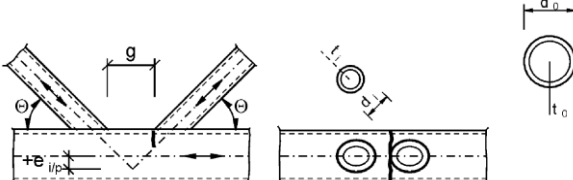
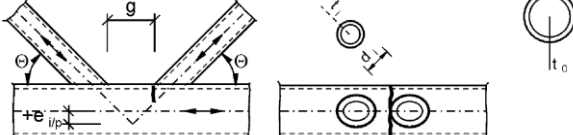
6.7.2.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-67 dargestellt.

Tabelle 6-67: K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-67: K and N circular structural hollow section joints with gap according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall		Konstruktionsdetail	Anforderungen
a) 90 m = 5	$\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$		siehe Tabelle 6-65
b) 45 m = 5	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$		

6.7.2.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt“, liegen sehr viele Versuchsergebnisse vor, wie Tabelle 6-68 zeigt. Die Versuchsdaten stammen aus einigen wenigen Quellen, in denen eine Vielzahl an Versuchen an verschiedenen Probekörpern durchgeführt wurde. Daraus ergibt sich eine große Anzahl an Serien, die oftmals nur wenige Versuche enthalten.

Tabelle 6-68: Übersicht Datengrundlage: „K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt“

Table 6-68: Overview database: „K and N circular structural hollow section joints with gap“

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	210
Anzahl Quellen	8
Anzahl Serien	72

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt“ ist in Bild 6-158 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt. Dort wird bereits die durch die zahlreichen Geometrieabhängigkeiten gegebene große Streuung sichtbar.

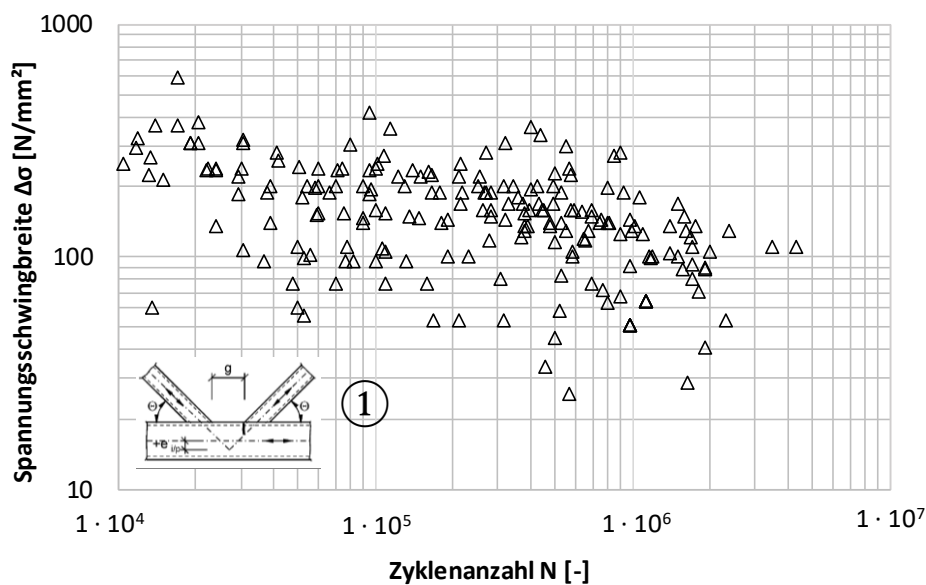


Bild 6-158: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt“ #042 #043 #044 #051 #052 #289 #290 #1020

Figure 6-158: Illustration of experimental fatigue data for detail „K and N circular structural hollow section joints with gap“

6.7.2.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Die Versagensmerkmale der K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt hängen sehr stark von der Geometrie und der Belastung der Probekörper ab. Bild 6-159 zeigt einige Beispiele von Ermüdungsrissen in derartigen Rohrknoten.

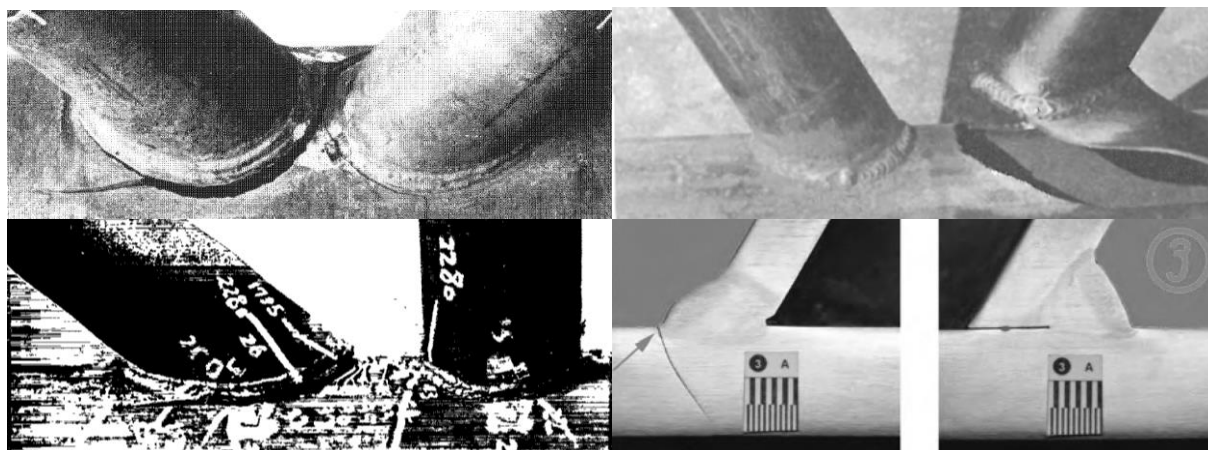


Bild 6-159: Rohrknotten mit Rissen am Schweißnahtübergang zum Gurt #043 #044 #051 #1020 (v.l.o.n.r.u.)

Figure 6-159: joint with cracks at the weld toe to the chord #043 #044 #051 #1020 (f.t.l.t.b.r.)

In den meisten Studien wird eine Rissinitiierung am Schweißnahtübergang zwischen Diagonale und Gurt festgestellt, oftmals an der Kronenspitze #044. Je nach Geometrie der Rohrknotten wächst der Riss in die Diagonale oder den Gurt #051.

Zirn differenzierte in seinen Untersuchungen den Versagensmodus je nach Wandstärkenverhältnis von Gurt- und Diagonalrohr. Er stellte fest, dass der Riss bei besonders kleinen Wandstärkenverhältnissen $< 0,56$ stets am Schweißnahtübergang stattfindet und in die Diagonale hinein wächst. Bei größeren Wandstärkenverhältnissen breitet sich der Riss auch ins Gurtrohr aus. Bei annähernd gleichen Wandstärken bleibe der Riss im Schweißnahtübergang #043. Im Projekt P815 wurden sehr ausführliche Versuchsserien zu verschiedenen Einflüssen auf die Ermüdung von Rohrknotten durchgeführt #1020. Die Beobachtungen von Zirn #043 konnten dabei bestätigt werden, wenn die Belastung aus einer Strebennormalkraft bestehe. Bei der Beanspruchung durch Strebenbiegung begann das Risswachstum am Schweißnahtübergang an Kronenferse und ging in die Diagonale über. Im Fall einer Gurtbelastung ist der Schweißnahtübergang zum Gurt an Kronenferse und -spitze maßgebend, während der Rissfortschritt in den Gurt festgestellt werden konnte. Bei einer kombinierten Beanspruchung wächst der Riss vom Schweißnahtübergang stets in den Gurt. Beim Trägerversuch, wo nicht nur ein Rohrknotten, sondern ein gesamter Fachwerkträger getestet wurde, begann der erste Ermüdungsris am Schweißnahtübergang der Strebe und setzte sich in die Strebe fort. Bei nachbehandelten Proben verlagerte sich der Versagensort zur Schweißnahtwurzel bzw. es kam zum Schweißnahtversagen #1020.

6.7.2.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

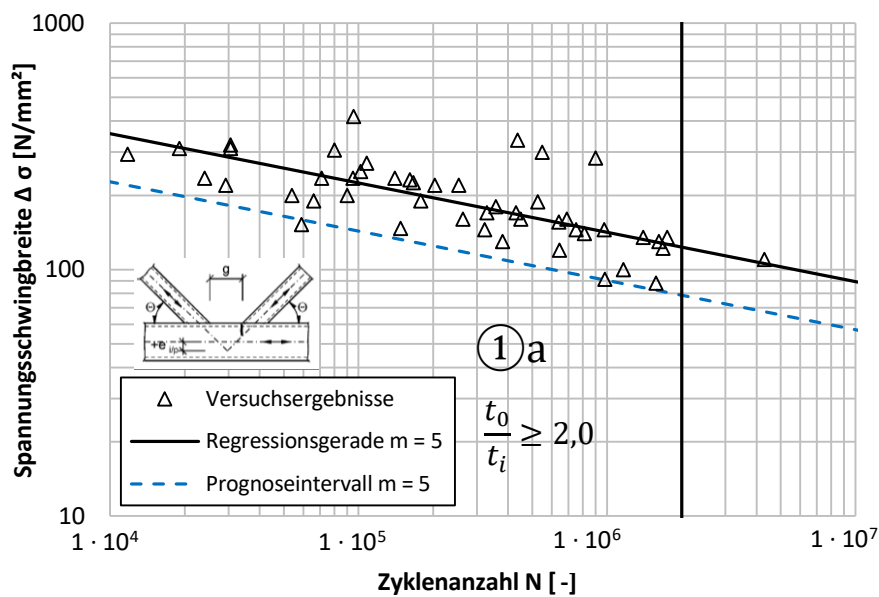
Im Fall der Rohrknotten existieren aufgrund der komplexen Geometrie zahlreiche Einflussparameter auf die Ermüdungsfestigkeit. Zunächst kann festgehalten werden, dass die Art der Belastung einen entscheidenden Einfluss hat. Zirn stellt einen Abfall der Schwingfestigkeit bei zunehmender axialer Gurtbelastung fest #043. Da das Versagen fast ausschließlich vom Schweißnahtübergang ausgeht, bringt die HV-Naht gegenüber der Kehlnaht keine Verbesserung. Das Wandstärkenverhältnis hat einen großen Einfluss: mit fallender Gurtwanddicke nimmt die Schwingfestigkeit ab. Jedoch existiert hier ein Grenzwert, ab dem sich keine Steigerung der Schwingfestigkeit mehr zeigt. Ferner hat das

Durchmesser-Verhältnis einen maßgebenden Einfluss: mit zunehmendem Durchmesser-Verhältnis von Diagonale zu Gurt steigt die Schwingfestigkeit an. Der Diagonalrohranschlusswinkel hat, so Zirn, einen geringen Einfluss. Der Streckgrenzeinfluss wirkt sich lediglich im Zeitfestigkeitsbereich aus #043. Auch in #051 konnte ein Streckgrenzeinfluss nicht festgestellt werden. Hier wird festgehalten, dass die Ermüdungsfestigkeit mit fallendem Spalt-zu-Durchmesser-Verhältnis steigt #051. In #1020 konnte außerdem beobachtet werden, dass bei den Rohrknoten kein Bauteileinfluss vorhanden zu sein scheint. Nachbehandlungsmethoden (höherfrequentes Hämmern) zeigten eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass die praxistypischen Schweißnahtunregelmäßigkeiten an der Nahtwurzel keinen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten der Rohrknoten besaßen #1020.

6.7.2.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Wie Tabelle 6-65 darstellt, beinhaltet der Kerbfallkatalog zahlreiche Geometrieanforderungen, die wie Tabelle 6-66 zeigt, größtenteils von den betrachteten Serien nicht eingehalten werden. Bei den Probekörpern dieses Details mit einem Wandstärkenverhältnis von $\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$ (Fall a)) sind in keiner der 26 Serien alle Geometrieanforderungen erfüllt. Dies betrifft vor allem die Anforderungen 1, 2, 3 und 6 (siehe Tabelle 6-65). Es kommen u. A. Gurtwandstärken von 20 und 40 mm vor und Strebenwinkel von 60°. Es wurden nichtsdestotrotz bis auf nachbehandelte Proben und Knoten mit 4 Diagonalen alle Daten zur Kerbfallableitung herangezogen, welche in Bild 6-160 dargestellt ist.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 79 [N/mm²]

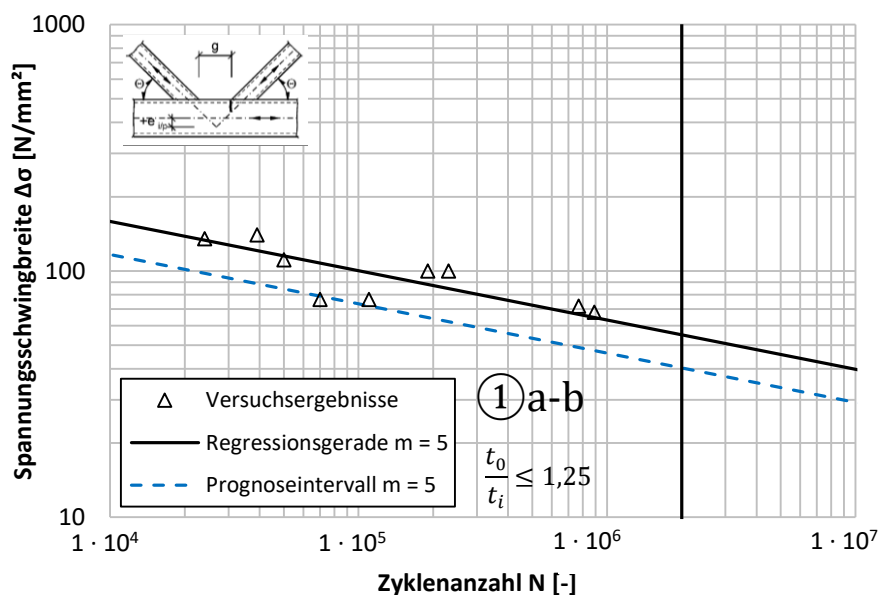
Bild 6-160: Kerbfallableitung „K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt“ mit $\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$ (Fall a)) anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #043 #051 #1020)

Figure 6-160: Fatigue classification of „K and N circular structural hollow section joints with gap“ with $\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$ (case a)) based on selected test results

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 79 und liegt damit unterhalb der derzeit gültigen Kerbfallklasse 90 in DIN EN 1993-1-9 [1].

Dabei ist jedoch zu beachten, dass verschiedene Geometrieanforderungen nicht eingehalten sind.

Zum Fall b) des gleichen Details mit dem Wandstärkenverhältnis $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$ sind keine Versuchsdaten vorhanden. Stattdessen gibt es jedoch einige Serien, die ein Wanddickenverhältnis von bis zu $\frac{t_0}{t_i} \leq 1,25$ aufweisen. Diese wurden ersatzweise zur Beurteilung des Details „K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt“ mit $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$ (Fall b)) herangezogen und hier mit „Fall a-b mit $\frac{t_0}{t_i} \leq 1,25$ “ bezeichnet, wie Bild 6-161 zeigt.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 40 [N/mm²]

Bild 6-161: Kerbfallableitung „K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt“ mit $\frac{t_0}{t_i} \leq 1,25$ (Fall b)) anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #043 #290)

Figure 6-161: Fatigue classification of „K and N circular structural hollow section joints with gap“ with $\frac{t_0}{t_i} \leq 1,25$ (case b)) based on selected test results

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 40 und liegt damit unterhalb der derzeit gültigen Kerbfallklasse 45 in DIN EN 1993-1-9 [1]. Dabei ist aber zu beachten, dass verschiedene Bedingungen nicht eingehalten sind. Aufgrund der von DIN EN 1993-1-9 [1] vorgegebenen Wandstärkenverhältnisse der Kerbfälle wurden Versuchsergebnisse, die zwischen Fall a) und Fall b) liegen bisher nicht betrachtet. Diese Geometrieabhängigkeit wird in Abschnitt 9.2.3 behandelt.

6.7.3 K- und N-Rechteckprofil-Knoten mit Spalt – Detail 2

K and N rectangular structural hollow section joints with gap – Detail 2

6.7.3.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der K- und N-Rechteckprofil-Knoten mit Spalt nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-69 dargestellt.

Tabelle 6-69: K- und N-Rechteck-Knoten mit Spalt nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-69: K and N rectangular structural hollow section joints with gap according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall		Konstruktionsdetail	Anforderungen
a) 71 m = 5	$\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$		siehe Tabelle 6-65
b) 36 m = 5	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$		

6.7.3.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „K- und N-Rechteck-Knoten mit Spalt“ sind etwas weniger Daten als bei den Rundhohlprofilknoten vorhanden, wie Tabelle 6-70 zeigt.

Tabelle 6-70: Übersicht Datengrundlage: „K- und N-Rechteck-Knoten mit Spalt“

Table 6-70: Overview database: „K and N rectangular structural hollow section joints with gap K and N rectangular structural hollow section joints with gap“

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	87
Anzahl Quellen	2
Anzahl Serien	18

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „K- und N-Rechteck-Knoten mit Spalt“ ist in Bild 6-162 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt. Wie auch schon bei den Rundhohlprofilknoten fällt die enorme Streuung der Versuchspunkte auf.

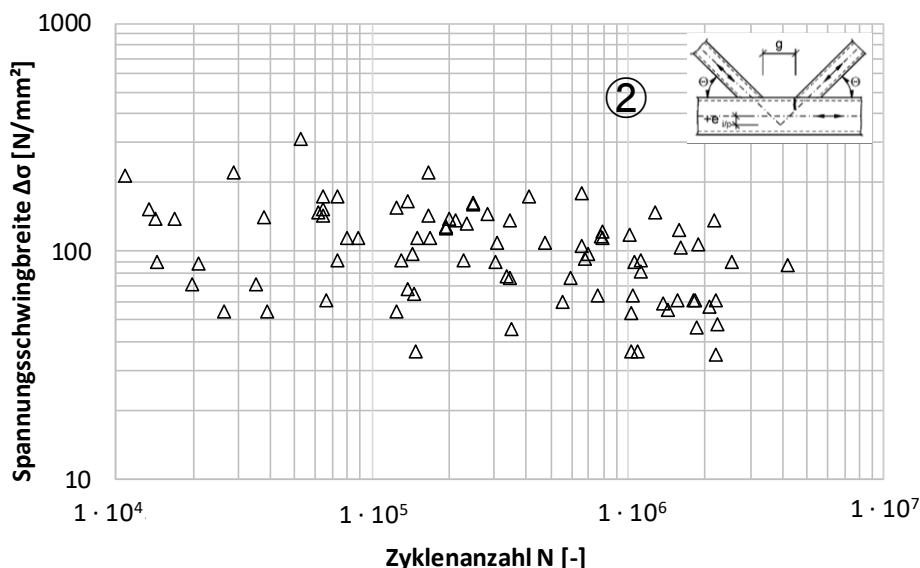


Bild 6-162: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „K- und N-Rechteck-Knoten mit Spalt“ #047 #048

Figure 6-162: Illustration of experimental fatigue data for detail “K and N rectangular structural hollow section joints with gap”

6.7.3.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

In #047 sind sowohl Versagensbilder mit in den Gurt gewachsenen Rissen als auch mit gerissenen Diagonalen dokumentiert. Bild 6-163 zeigt Beispiele mit Rissinitiierung am Schweißnahtübergang zum Gurt.

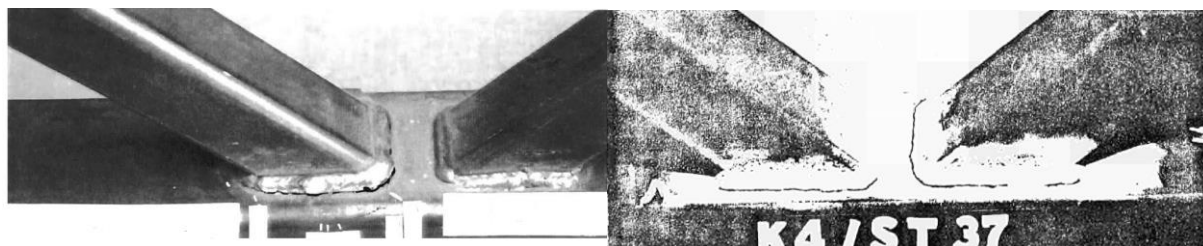


Bild 6-163: Rohrknotten mit Rissen am Schweißnahtübergang zum Gurt #047 #048 (v.l.n.r.)

Figure 6-163: joint with cracks at the weld toe to the chord #047 #048 (f.l.t.r.)

Das Versagen hänge laut #048 von der Geometrie und der Belastungssituation ab und kann im Gurt, in der Strebe, in der Schweißnaht und in einer Kombination festgestellt werden: Wenn Gurt- und Strebendicke gleich sind, trat das Versagen im Gurt auf. Bei dünneren Streben tritt der Riss in der Strebe auf.

6.7.3.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

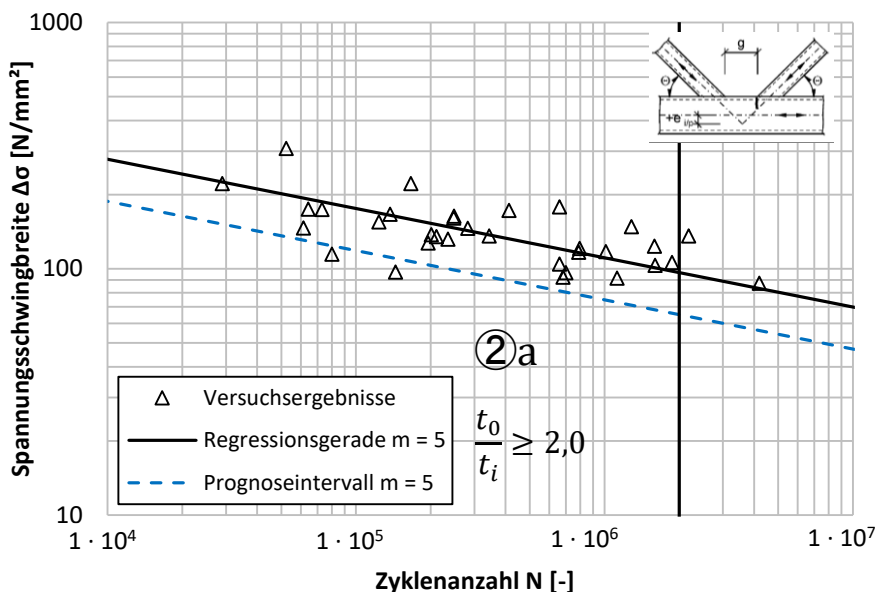
Significant influence parameters on the resistance side

In #047 konnte die im Eurocode aufgenommene Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit vom Wandstärkenverhältnis bestätigt werden. Dort wird ebenfalls dokumentiert, dass ein höherfestes Material sich unter bestimmten Umständen positiv auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken kann: Dies ist bei kleinen Wandstärken und kerbarmen Geometrien der Fall. Bei hochfesten Stählen habe außerdem die Nachbehandlung mit höherfrequenten Hämmern einen größeren positiven Einfluss als bei konventionellen Stählen #047. In den Untersuchungen von #048 konnte kein signifikanter Streckgrenzeinfluss festgestellt werden. Ebenfalls ist dort kein Einfluss durch die Fertigung (warm oder kalt gefertigte Hohlprofile) erkennbar. In dieser Studie wurde ferner festgestellt, dass die Ermüdungsfestigkeit in Bezug auf Rissinitiierung mit steigendem Anteil an Biegung im Vergleich zur Axialbelastung abnimmt. Der Mittelspannungseinfluss zeige sich im hochzyklischen Bereich bei Gurtversagen. Auch in dieser Studie zeigt sich das Wanddickenverhältnis als entscheidender Parameter. Das Breitenverhältnis sei hingegen weniger relevant. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass ein kleines Breite-zu-Dicke-Verhältnis des Gurtes zu höheren Ermüdungsfestigkeiten führt #048.

6.7.3.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Wie Tabelle 6-65 darstellt, beinhaltet der Kerbfallkatalog zahlreiche Geometrieforderungen, die wie Tabelle 6-66 zeigt, größtenteils von den betrachteten Serien nicht eingehalten werden. Bei Detail 2 sind jedoch die meisten Geometrieforderungen erfüllt, bis auf Bedingung 3 im Fall a) mit dem Wandstärkenverhältnis $\frac{t_o}{t_i} \geq 2,0$. Je Fall wurde eine Serie aussortiert, bei welcher der Ort der Spannungsermittlung nicht bekannt ist.



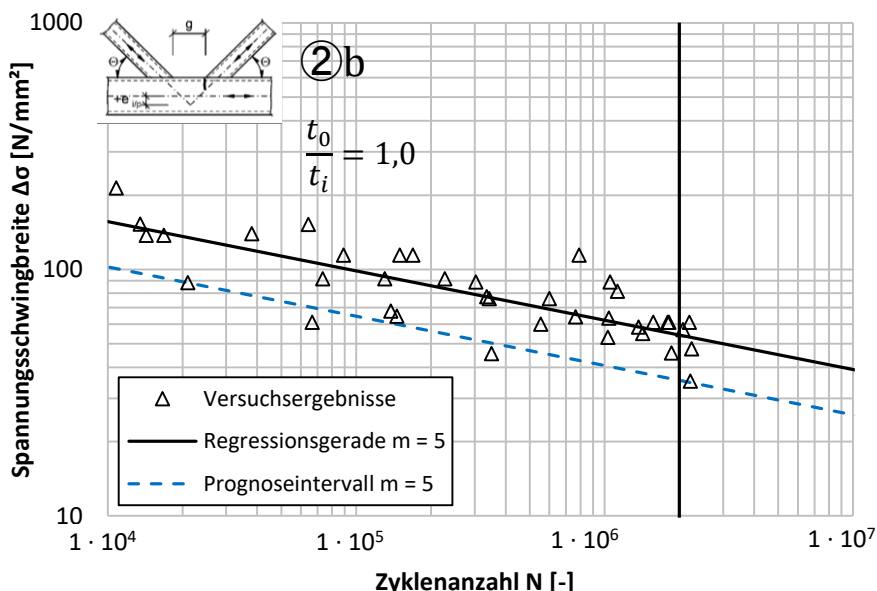
Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 65 [N/mm²]

Bild 6-164: Kerbfallableitung „K- und N-Rechteck-Knoten mit Spalt“ mit $\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$ (Fall a)) anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #048)

Figure 6-164: Fatigue classification of “K and N rectangular structural hollow section joints with gap” with $\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$ (case a)) based on selected test results

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 65 für Fall a) und liegt damit unterhalb der derzeit gültigen Kerbfallklasse 71 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-164. Dabei ist aber zu beachten, dass eine Bedingung nicht eingehalten ist.

In Fall b) wurden alle vorhandenen Versuchsergebnisse in die Auswertung mit einbezogen.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 35 [N/mm²]

Bild 6-165: Kerbfallableitung „K- und N-Rechteck-Knoten mit Spalt“ mit $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$ (Fall b)) anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #047 #048)

Figure 6-165: Fatigue classification of “K and N rectangular structural hollow section joints with gap” with $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$ (case b)) based on selected test results

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 35 und bestätigt damit die derzeit gültigen Kerbfallklasse 36 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-165. Weitere Geometrieinflüsse dieser Details werden in Abschnitt 9.2.3 betrachtet.

6.7.4 K-Knoten mit Überlappung – Detail 3

K joints with overlap – Detail 3

6.7.4.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der K-Knoten mit Überlappung nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-71 dargestellt.

Tabelle 6-71: K-Knoten mit Überlappung nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-71: K joints with overlap according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall		Konstruktionsdetail	Anforderungen
a) 71 m = 5	$\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$		siehe Tabelle 6-65
b) 56 m = 5	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$		

6.7.4.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „K-Knoten mit Überlappung“, sind zahlreiche Serien und Versuchsergebnisse bekannt, wie Tabelle 6-72 zeigt. Bei den K-Knoten mit Überlappung wird, anders als bei den Rohrknoten mit Spalt, nicht nach Profilgeometrie (rund oder rechteckig) unterschieden.

Tabelle 6-72: Übersicht Datengrundlage: „K-Knoten mit Überlappung“

Table 6-72: Overview database: “K joints with overlap“

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	196
Anzahl Quellen	7
Anzahl Serien	39

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „K-Knoten mit Überlappung“ ist in Bild 6-166 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

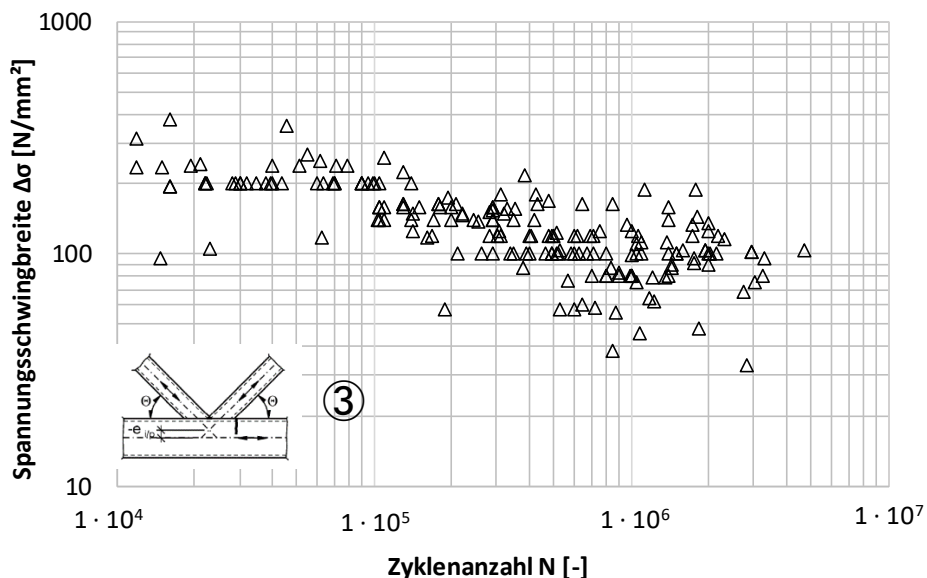


Bild 6-166: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „K-Knoten mit Überlappung“ #043 #044 #048 #050 #289 #1009 #1011

Figure 6-166: Illustration of experimental fatigue data for detail “K joints with overlap“

6.7.4.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Im Gegensatz zu Rohrknotten mit Spalt konnte bei Verbindungen mit überlappten Streben auch ein Wurzelriss festgestellt werden #043. Dieses Versagen äußert sich in einer geringeren Ermüdungsfestigkeit als ein Versagen, welches vom Schweißnahtübergang ausgeht. In #044 wird erwähnt, dass die Rissinitiierung an der Stelle begann, wo sich die drei Schweißnähte treffen. Der Riss wächst entlang des Übergangs und teilweise in die Schweißnaht oder in die Strebenwand.

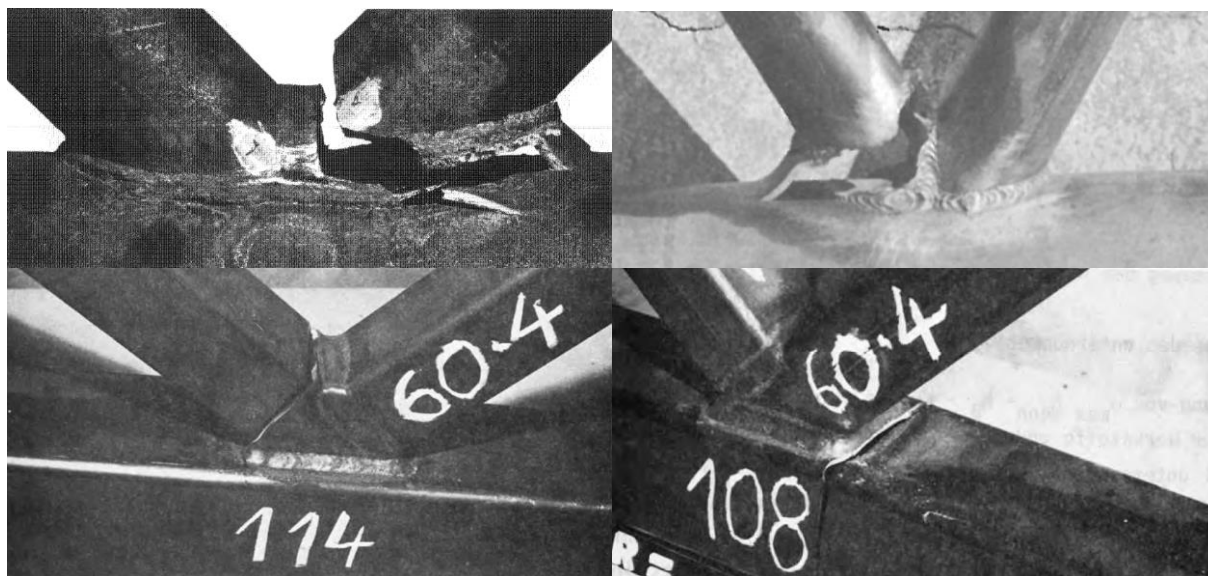


Bild 6-167: Rohrknotten mit Rissen #043 #044 #1011 (2x) (v.l.o.n.r.u.)

Figure 6-167: joint with cracks #043 #044 #1011 (2x) (f.t.l.t.b.r.)

Laut #289 entstanden Risse an der Schweißwulst und wuchsen durch die Schweißnaht bis zur Gurtwand hin. Ferner wurde in #1009 bzw. #1011 dokumentiert, dass der Versagensbereich mit steigender Gurtstärke vom Gurt zur Schweißnaht am Strebenschnittpunkt wechselt.

6.7.4.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

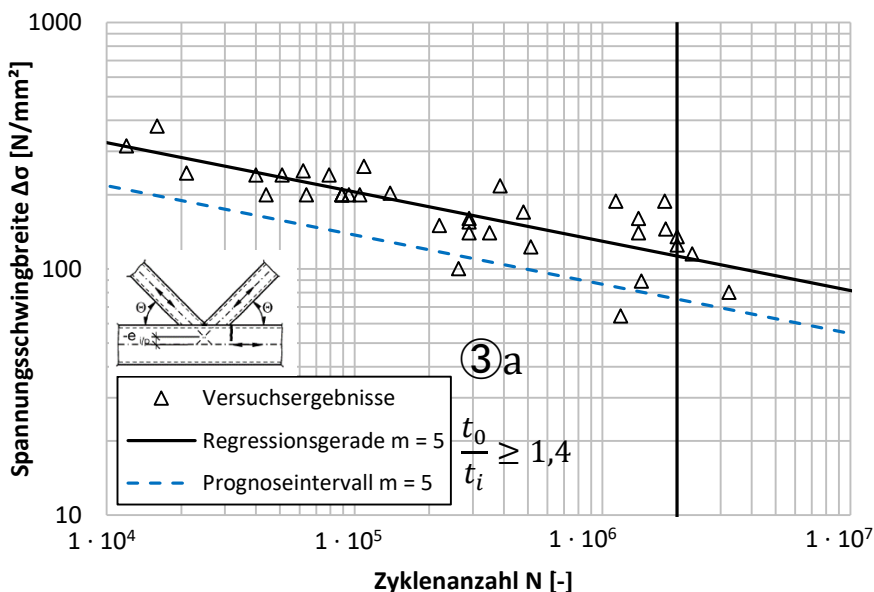
Significant influence parameters on the resistance side

Auch bei Rohrknoten mit überlappenden Streben gibt es zahlreiche Einflussgrößen auf der Widerstandsseite. Gemäß #043 und #048 sei ein Mittelspannungseinfluss erkennbar. Was die Belastung angeht, so zeige sich in Zirns Untersuchungen #043 ein Abfall der Ermüdungsfestigkeit mit zunehmender axialer Gurtrohrbelastung. In #048 wurde festgestellt, dass die Rissinitiierung umso früher beginne, je höher der Anteil an Biegung in der Strebe ist. Eine durchgeschweißte Naht erhöhe bei sich überlappenden Streben die Ermüdungsfestigkeit, da bei Kehlnähten ein kritischerer Wurzelriss vorkommen kann #043. Was die Geometrie angeht, konnte festgestellt werden, dass die Wöhlerlinie flacher verlaufe, je geringer die Ausmitte ist. Wie groß dieser Einfluss ist, hänge wiederum vom Strebenwinkel und dem Wanddickenverhältnis ab #043. Das Wanddickenverhältnis habe einen großen Einfluss #048, jedoch etwas geringer als bei Rohrknoten mit Spalt #043: mit fallender Gurtwanddicke nehme die Schwingfestigkeit ab. Jedoch existiere hier ein Grenzwert, ab dem sich keine Steigerung der Schwingfestigkeit mehr zeigt. Ferner habe das Durchmesserverhältnis einen maßgebenden Einfluss: mit zunehmendem Diagonal-zu-Gurt-Verhältnis steigt die Schwingfestigkeit an. Der Diagonalrohranschlusswinkel habe, so Zirn, einen geringen Einfluss. Der Streckgrenzeinfluss wirke sich lediglich im Zeitfestigkeitsbereich aus #043. In #048 wurde festgestellt, dass ein Streckgrenzeinfluss sich nicht als signifikant herausstelle. Ebenfalls sei dort, wie auch in #1011, kein Einfluss durch die Fertigung (warm oder kalt gefertigte Hohlprofile) erkennbar. Auch das Breitenverhältnis sei weniger relevant. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass ein kleines Breiten-zu-Dicken-Verhältnis des Gurtes zu höheren Ermüdungsfestigkeiten führe #048. In #1009 wurden spannungsarm geglühte Probekörper untersucht, wobei sich kein großer Einfluss der Nachbehandlung zeige. In #1011 wird erwähnt, dass geglühte Proben eine geringere Ermüdungsfestigkeit aufweisen würden, da durch das spannungsarmglühen positiv wirkende Druckeigenspannungen abgebaut würden.

6.7.4.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Zunächst ist zu erwähnen, dass für Fall a) des Details 3 größtenteils Probekörper mit rundem Querschnitt untersucht wurden, während die Querschnitte bei Fall b) meistens quadratisch sind. Wie Tabelle 6-65 darstellt, beinhaltet der Kerbfallkatalog zahlreiche Geometrieanforderungen, die wie Tabelle 6-66 zeigt, größtenteils von den betrachteten Serien nicht eingehalten werden. Bei Detail 3 ist im Fall a) mit dem Wandstärkenverhältnis $\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$ bei keiner Serie die Bedingung 3, siehe Tabelle 6-65, erbracht. Die Geometrie dreier Serien genügte zusätzlich Anforderung 2, siehe Tabelle 6-65, nicht. Dennoch wurden alle Serien zur Auswertung herangezogen. Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 75 und bestätigt daher Kerbfallklasse 71 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-168.

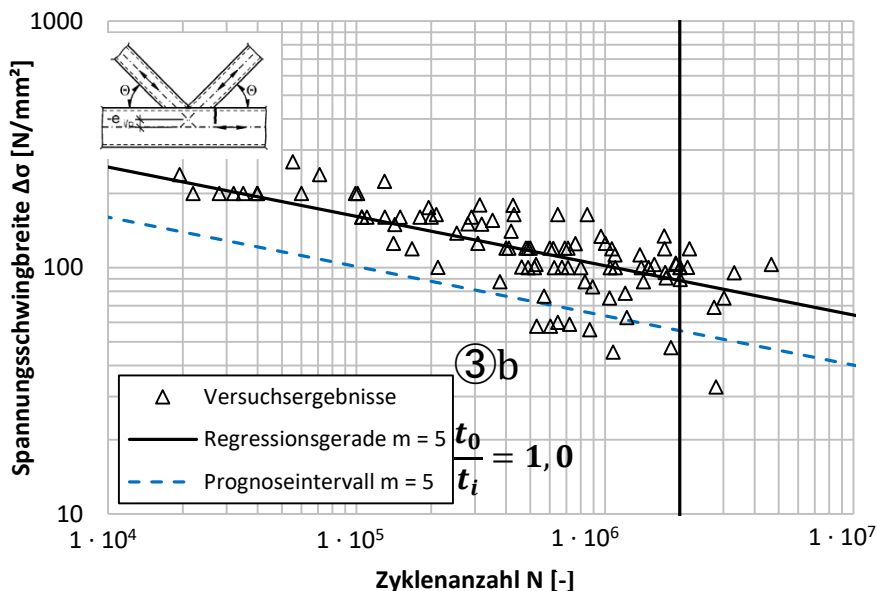


Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 75 [N/mm²]

Bild 6-168: Kerbfalleitung „K- Knoten mit Überlappung“ mit $\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$ (Fall a) anhand verfügbarer Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #043 #048)

Figure 6-168: Fatigue classification of “K joints with overlap“ with $\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$ (case a) based on based on selected test results

Im Fall b) und dem Wandstärkenverhältnis von $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$ ist teilweise Anforderung 2 und teilweise Anforderung 6 nicht erbracht. Eine Serie wurde aussortiert, da bei ihr vier Bedingungen (2, 3, 4 und 5) nicht zutrafen. Nachbehandelte Serien wurden ebenfalls von der Auswertung ausgeschlossen.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 55 [N/mm²]

Bild 6-169: Kerbfalleitung „K- Knoten mit Überlappung“ mit $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$ (Fall b) anhand verfügbarer Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #044 #048 #1009 #1011)

Figure 6-169: Fatigue classification of “K joints with overlap“ with $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$ (case b) based on based on selected test results

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 55 und bestätigt aus diesem Grund Kerbfallklasse 56 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-169.

6.7.5 N-Knoten mit Überlappung – Detail 4

N joints with overlap – Detail 4

6.7.5.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der N- Knoten mit Überlappung nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-73 dargestellt.

Tabelle 6-73: N-Knoten mit Überlappung nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-73: N joints with overlap according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Anforderungen
a) 71 m = 5	$\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$		siehe Tabelle 6-65
b) 50 m = 5	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$		

6.7.5.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „N-Knoten mit Überlappung“ sind viele Serien vorhanden, die jeweils eher wenige Versuchsergebnisse enthalten, wie Tabelle 6-74 zeigt.

Tabelle 6-74: Übersicht Datengrundlage: „N-Knoten mit Überlappung“

Table 6-74: Overview database: “N joints with overlap”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	54
Anzahl Quellen	4
Anzahl Serien	17

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „N- Knoten mit Überlappung“ ist in Bild 6-170 dargestellt. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

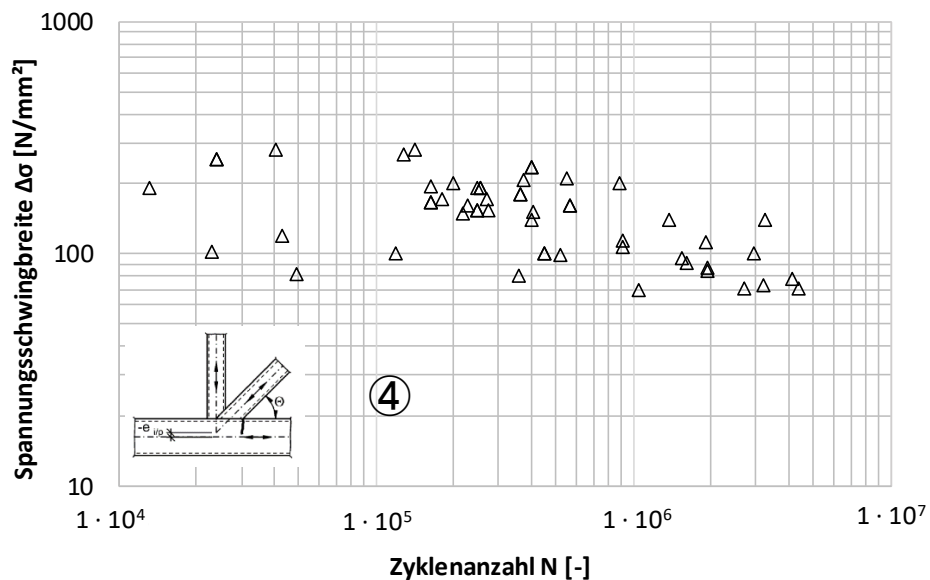


Bild 6-170: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „N-Knoten mit Überlappung“ #048 #050 #051 #052

Figure 6-170: Illustration of experimental fatigue data for detail “N joints with overlap”

6.7.5.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Was die Versagensmerkmale angeht, so wird in #048 erwähnt, dass je nach Geometrie Risse sowohl im Gurt, in den Diagonalen, als auch in der Schweißnaht entstehen. Selbst im Fall von dicken Streben treten Risse in der Diagonale stets in Kombination mit Rissen im Gurt auf #048. Bild 6-171 zeigt einen gerissenen Gurt eines N-Knotens.

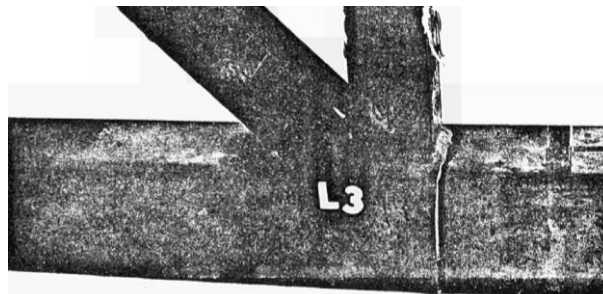


Bild 6-171: N-Knoten mit Riss im Gurt #048

Figure 6-171: N node with crack in chord #048

6.7.5.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

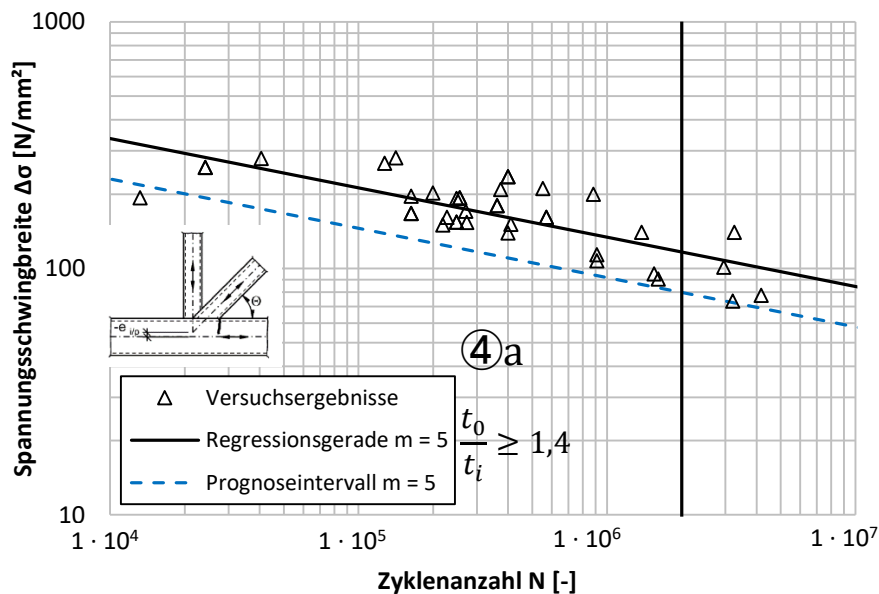
Significant influence parameters on the resistance side

In #051 ist dokumentiert, dass Durchmesser Verhältnis und Wandstärkenverhältnis wenig Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit und den Versagensmodus hätten. Die Größe der Überlappung der Streben habe hingegen einen bemerkenswerten Einfluss #051. Gemäß #048 ist ein Mittelspannungseinfluss erkennbar. Dort wurde ferner festgestellt, dass die Rissinitiierung umso früher beginnt, je höher der Anteil an Biegung in der Strebe ist. Das Wanddickenverhältnis habe einen großen Einfluss #048. Außerdem stelle der Streckgrenzeinfluss sich nicht als signifikant heraus. Ebenfalls ist dort kein Einfluss durch die Fertigung (warm oder kalt gefertigte Hohlprofile) erkennbar. Auch das Breitenverhältnis sei weniger relevant. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass ein kleines Breiten-zu-Dicken-Verhältnis des Gurtes zu höheren Ermüdungsfestigkeiten führt #048.

6.7.5.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Wie Tabelle 6-65 darstellt, beinhaltet der Kerbfallkatalog zahlreiche Geometrieanforderungen, die wie Tabelle 6-66 zeigt, größtenteils von den betrachteten Serien nicht eingehalten werden. Bei Detail 4 trifft dies im Fall a) mit dem Wandstärkenverhältnis von $\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$ teilweise auf Bedingung 1, 3, 5 und 6 (Tabelle 6-65) zu. Anforderung 3 ist bei allen Serien bis auf eine nicht eingehalten. Nichtsdestotrotz wurden diese Serien zur Auswertung herangezogen.



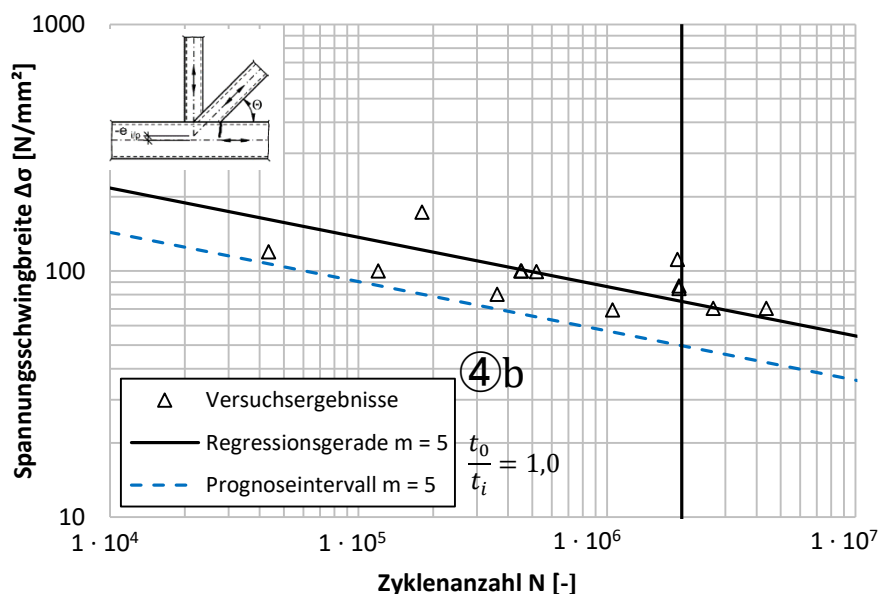
Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 80 [N/mm²]

Bild 6-172: Kerbfallableitung „N-Knoten mit Überlappung“ mit $\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$ (Fall a)) anhand verfügbarer Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #048 #051)

Figure 6-172: Fatigue classification of “N joints with overlap” with $\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$ (case a)) based on selected test results

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 80 und liegt höher als Kerbfallklasse 71 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-172, obwohl einige Geometrieanforderungen nicht erfüllt sind.

In Fall b) mit dem Wandstärkenverhältnis von $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$ sind bei einer Serie Bedingung 3 und 5 (Tabelle 6-65) nicht erfüllt. Bei allen weiteren Serien wird die Anforderung 6 nicht eingehalten. Nichtsdestotrotz wurden diese Serien zur Auswertung herangezogen. Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 50 und bestätigt Kerbfallklasse 50 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-173.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$ mit $m = 5$: 50 [N/mm²]

Bild 6-173: Kerbfallableitung „N-Knoten mit Überlappung“ mit $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$ (Fall b)) anhand verfügbarer Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #048 #051)

Figure 6-173: Fatigue classification of “N joints with overlap” with $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$ (case b)) based on selected test results

6.8 Orthotrope Platten mit Hohlrippen Orthotropic decks – closed stringers

6.8.1 Übersicht

Overview

Tabelle 8.8 der DIN EN 1993-1-9 [1] regelt die Ermüdungsfestigkeit von orthotropen Platten mit Hohlrippen. Die Details umfassen Längsrippen in verschiedenen Ausführungsformen und deren Stöße. Außerdem wird der Querträgersteg behandelt. Ferner beinhaltet die Tabelle zwei Details zur Naht zwischen Deckblech und Rippe in verschiedenen Ausführungsformen. Im Hintergrunddokument zur Norm sind lediglich zwei Quellen benannt, sodass der Hauptteil der im Folgenden beschriebenen Daten neu recherchiert wurde. Zum Thema der Ermüdungsfestigkeit von orthotropen Platten mit Hohlrippen liegt eine Dissertation von M.H. Kolstein [102] vor, der sich intensiv mit der Neubewertung dieser Tabelle in DIN EN 1993-1-9 [1] befasst hat. Hier wurden jedoch auch zusätzlich numerische Methoden eingesetzt, um die Einflüsse gewisser Details auf ihre Ermüdungsfestigkeit bewerten zu können. Das Konzept der hier vorliegenden Auswertungen bezieht sich, wie in den anderen Abschnitten des Kapitel 6, ausschließlich auf experimentelle Untersuchungsergebnisse, die in vorhandenen, den Autoren zugänglichen Quellen konkret dokumentiert wurden. Nichtsdestotrotz werden die im Rahmen dieser Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse in Abschnitt 10.9 mit Lösungen aus [102] verglichen.

6.8.2 Durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger – Detail 1

Continuous longitudinal stringer with additional cut-out in cross girder – Detail 1

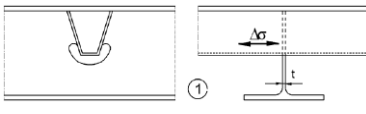
6.8.2.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-75 dargestellt.

Tabelle 6-75: Durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-75: Continuous longitudinal stringer with additional cut-out in cross girder according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
a) 80	$t \leq 12 \text{ mm}$		Durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger. Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
b) 71	$t > 12 \text{ mm}$		

6.8.2.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger“ ist nur eine begrenzte Anzahl an Daten bekannt, wie Tabelle 6-76 zeigt.

Tabelle 6-76: Übersicht Datengrundlage: „durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger“

Table 6-76: Overview database: “continuous longitudinal stringer with additional cut-out in cross girder”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	6
Anzahl Quellen	3
Anzahl Serien	4

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger“ ist in Bild 6-174 zu erkennen. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

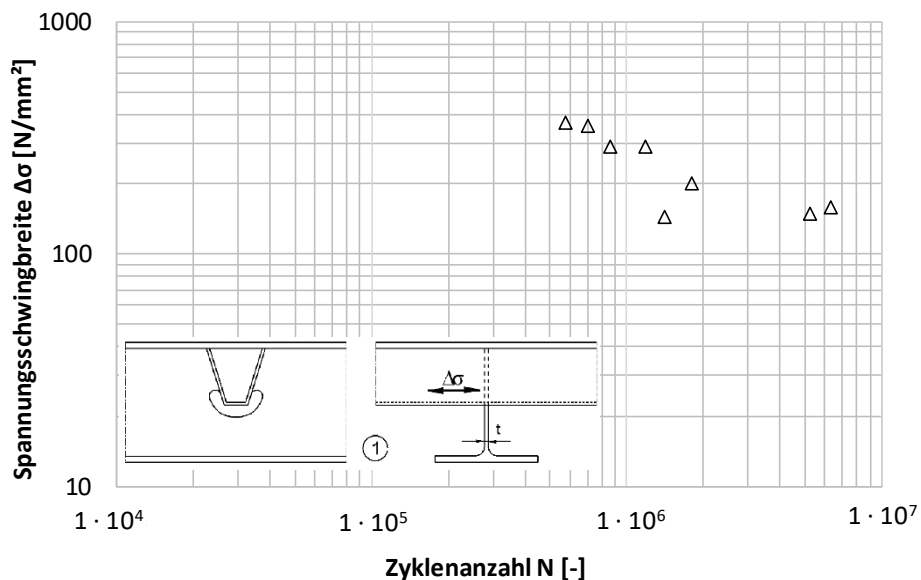


Bild 6-174: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger“ #360 #361 #362

Figure 6-174: Illustration of experimental fatigue data for detail “continuous longitudinal stringer with additional cut-out in cross girder”

6.8.2.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Risse begannen im Querträgersteg am Ausschnitt und am Schweißnahtübergang der Rippe am unteren Ende der Schweißnaht. Ein Versagen am Querträgersteg scheint kritischer zu sein als ein Versagen an der Schweißnaht #360. Bild 6-175 zeigt ein Beispiel. In #361 sind verschiedene Risstypen dokumentiert. Zum einen kommt ein Schweißnahtübergangsversagen der Rippe am unteren Ende der Schweißnaht vor. Zum anderen konnte ebenfalls ein Versagen am Ende oder Anfang der Schweißnaht im Querträger festgestellt werden. Ferner kam ein Versagen am Ende der Schweißnaht in der Rippe vor #361 #362.

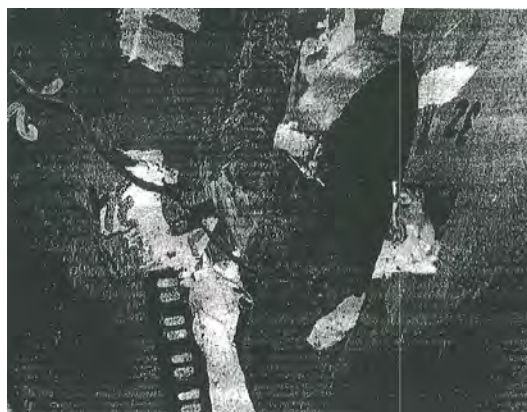


Bild 6-175: Probekörper mit Ermüdungsriss #360

Figure 6-175: Specimen with fatigue crack #360

6.8.2.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

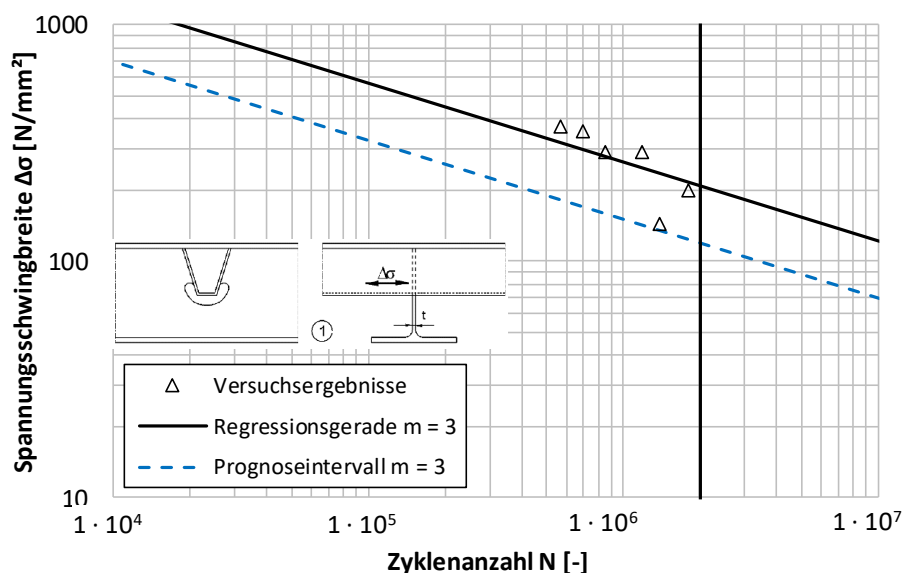
Significant influence parameters on the resistance side

Aufgrund der aufwändigen, bauteilähnlichen Versuche an diesem Detail wurden nicht viele unterschiedliche Konfigurationen untersucht. Die Ermüdungsfestigkeit der durchgehenden Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger hängt vom Typ des Ausschnitts ab. Je nachdem wie die Rundung des Ausschnitts geformt ist, ergeben sich andere Spannungsverteilungen #360. Diese Feststellung wurde auch in #361 und #362 gemacht, jedoch ergibt sich trotz unterschiedlicher Spannungsverteilungen keine unterschiedliche Ermüdungsfestigkeit für verschiedene Geometrien der Ausschnitte.

6.8.2.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Bild 6-176 zeigt die Kerbfallableitung der durchgehenden Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 119 [N/mm^2]

Bild 6-176: Kerbfallableitung „durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #360 #361 #362)

Figure 6-176: Fatigue classification of „continuous longitudinal stringer with additional cut-out in cross girder“ based on selected test results

Die Dicke des Querträgerstegs, nach welcher im Kerbfallkatalog [1] die Ermüdungsfestigkeit abhängt, ist nicht in allen Quellen dokumentiert. In einer Untersuchung betrug die Dicke 12 mm, sodass die Ergebnisse Fall a) zuzuordnen sind. Aufgrund der geringen Datenbasis werden dennoch alle Versuchsdaten zur Auswertung herangezogen. Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 119 und liegt damit deutlich über der derzeit gültigen Kerbfallklasse 80 bzw. 71 in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-176. Hier ist jedoch zu beachten, dass nur eine sehr geringe Datenbasis vorliegt.

6.8.3 Durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger – Detail 2

Continuous longitudinal stringer without additional cut-out in cross girder – Detail 2


6.8.3.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der durchgehenden Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-77 dargestellt.

Tabelle 6-77: Durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-77: Continuous longitudinal stringer without additional cut-out in cross girder according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
a) 80	$t \leq 12 \text{ mm}$		Durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger. Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
b) 71	$t > 12 \text{ mm}$		

6.8.3.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger“ ist nur eine begrenzte Anzahl an Daten bekannt, wie Tabelle 6-78 zeigt.

Tabelle 6-78: Übersicht Datengrundlage: „durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger“

Table 6-78: Overview database: “continuous longitudinal stringer without additional cut-out in cross girder”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	11
Anzahl Quellen	4
Anzahl Serien	3

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger“ ist in Bild 6-177 zu erkennen. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

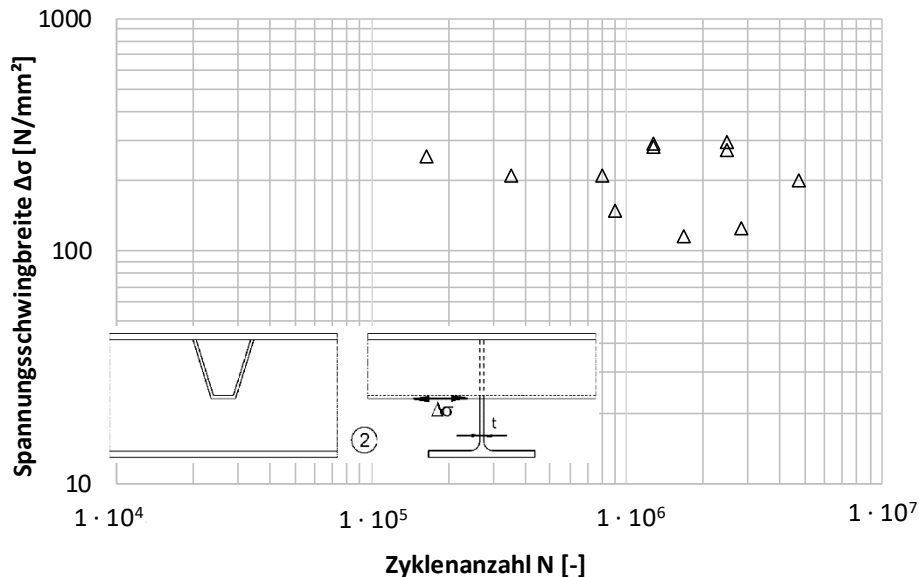


Bild 6-177: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger“ #354 #360 #361 #362

Figure 6-177: Illustration of experimental fatigue data for detail “continuous longitudinal stringer without additional cut-out in cross girder”

6.8.3.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Bild 6-178 zeigt ein beispielhaftes Versagensbild einer durchgehenden Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger.



Bild 6-178: Probekörper mit Ermüdungsriss #360

Figure 6-178: Specimen with fatigue crack #360

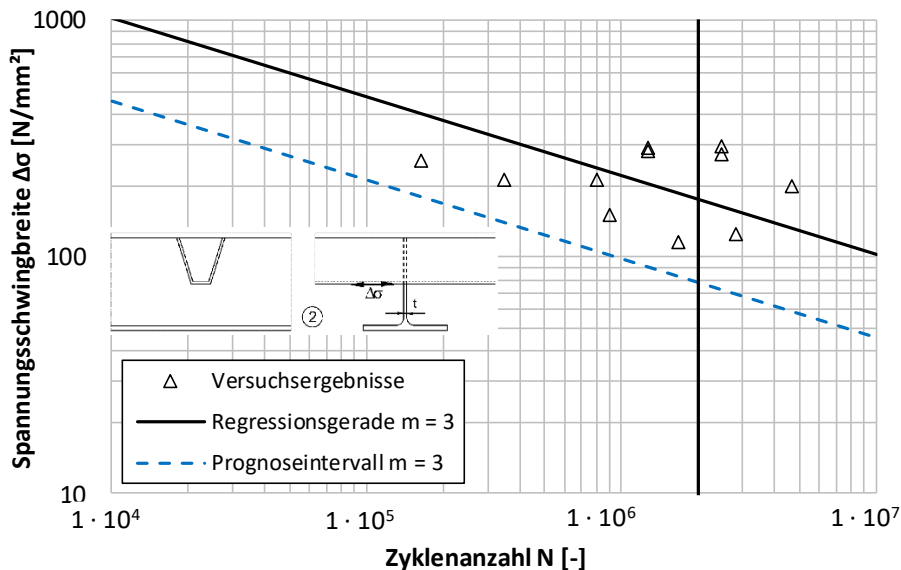
Das Versagen dieses Details charakterisiert sich durch Schweißnahtübergangsversagen in der Rippe. Risse starten in der Nähe der Ausrundung am unteren Steg der Rippe. Sie entwickeln sich sowohl entlang des Schweißnahtübergangs, als auch durch die Schweißnaht in den Querträgersteg #360. Auch in #361 ist ein Versagen am Schweißnahtübergang an der Rundung der Rippe beobachtet worden.

6.8.3.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Auch bei diesem Detail ist in einer Quelle die Dicke des Querträgersteges nicht angegeben. In den anderen Fällen beträgt die Dicke 10 mm bzw. 12 mm, sodass Fall a) beurteilt werden kann. Aufgrund der geringen Datenbasis wurden alle Versuchsergebnisse ge-

meinsam ausgewertet. Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 78 und bestätigt damit die derzeit gültigen Kerbfallklasse 80 für Fall a) in DIN EN 1993-1-9 [1], siehe Bild 6-179.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$:

78

 [N/mm²]

Bild 6-179: Kerbfallableitung „durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #354 #360 #361 #362)

Figure 6-179: Fatigue classification of „continuous longitudinal stringer without additional cut-out in cross girder“ based on selected test results

6.8.4 Längsrippen am Querträger stoßen – Detail 3

Separate longitudinal stringer each side of the cross girder – Detail 3

6.8.4.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der am Querträger stoßenden Längsrippen nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-79 dargestellt.

Tabelle 6-79: Am Querträger stoßenden Längsrippen nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-79: Separate longitudinal stringer each side of the cross girder according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
36		Längsrippen am Querträger stoßen	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.

6.8.4.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „am Querträger stoßenden Längsrippen“ sind etwas mehr Daten als bei den ersten beiden Details vorhanden, wie Tabelle 6-80 zeigt.

Tabelle 6-80: Übersicht Datengrundlage: „am Querträger stoßenden Längsrippen“

Table 6-80: Overview database: “separate longitudinal stringer each side of the cross girder”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	28
Anzahl Quellen	2
Anzahl Serien	6

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „am Querträger stoßenden Längsrippen“ ist in Bild 6-180 zu erkennen. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

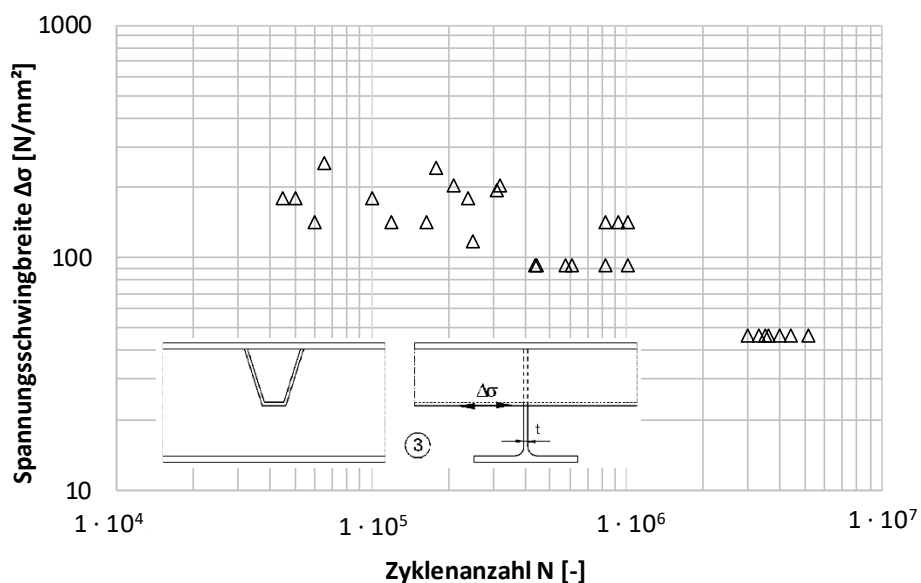


Bild 6-180: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „am Querträger stoßenden Längsrippen“ #354 #355

Figure 6-180: Illustration of experimental fatigue data for detail “separate longitudinal stringer each side of the cross girder”

6.8.4.3 Versagensmerkmale Failure characteristics

Bild 6-181 zeigt zwei Versagensbilder der am Querträger gestoßenen Längsrippen.

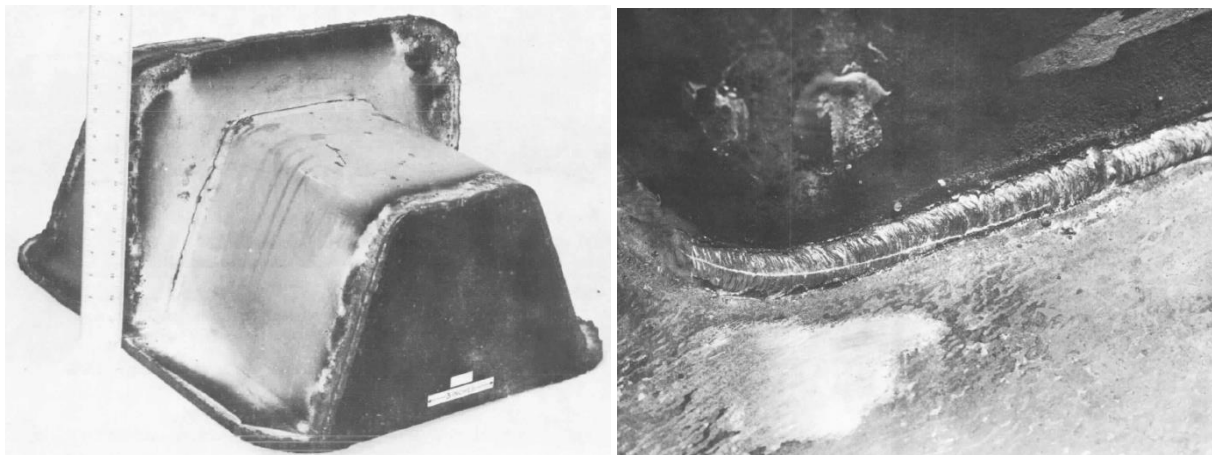


Bild 6-181: Probekörper mit Ermüdungsrissen #355

Figure 6-181: Specimens with fatigue cracks #355

Bei Untersuchungen von Hänsch und Müller #354 trete das Versagen im Bereich der Anschlusschweißnaht, entweder am Nahtübergang zur Rippe oder in der Naht selbst auf. In #355 ist dokumentiert, dass alle Ermüdungsrisse auf ein Wurzelversagen zurückzuführen seien. Die Risse wuchsen durch die Schweißnaht parallel zur Oberfläche des Querträgers.

6.8.4.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

Die Querschnittsform der Rippe (U- oder V-Form) scheint keinen wesentlichen Einfluss auf die Lage des Bruches oder die Ermüdungsfestigkeit zu haben #354. Es zeigte sich allerdings, dass am Querträger gestoßenen Längsrippen mit Kehlnähten eine deutliche geringere Ermüdungsfestigkeit aufweisen, als solche mit HV-Nähten #354. In #355 wurde der Einfluss eines Spalts zwischen Rippe und Querträger untersucht, der jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit zu haben scheint. Auch die Schweißfolge spielt keine Rolle #355.

6.8.4.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Da die Form der Schweißnaht einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit zu haben scheint, wurden die Versuchsergebnisse an Proben mit Kehl- und Stumpfnähten getrennt ausgewertet, wie Bild 6-182 zeigt. Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 47 für Kehlnähte, was oberhalb der derzeit gültigen Kerbfallklasse 36 in DIN EN 1993-1-9 [1] liegt. Die Auswertung der Proben mit HV-Nähten liefert mit Kerbfall 70 sogar ein deutlich größeres Ergebnis. Im aktuellen Kerbfallkatalog [1] wird nicht nach der Art der Schweißnaht unterschieden, was angesichts der hier beschriebenen Ergebnisse jedoch empfehlenswert scheint.

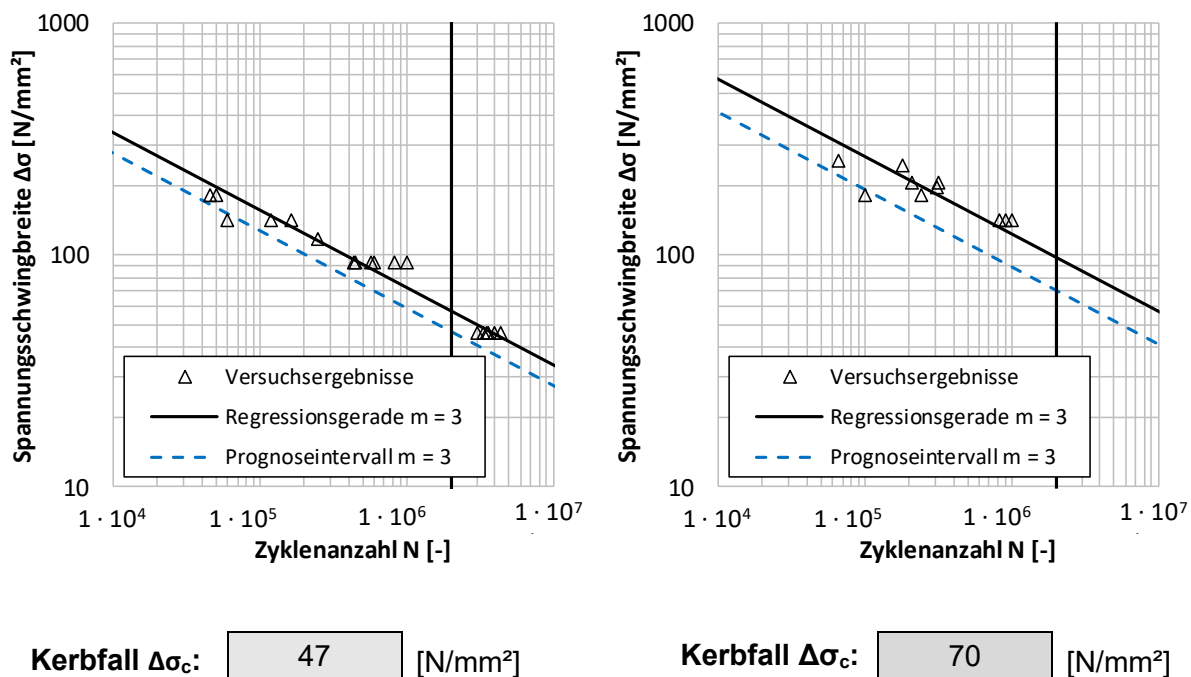


Bild 6-182: Kerbfallableitung „am Querträger stoßenden Längsrippen“ mit Kehlnähten (links) und Stumpfnähten (rechts) anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #354 #355)

Figure 6-182: Fatigue classification of „separate longitudinal stringer each side of the cross girder“ with fillet welds (left) and butt welds (right) based on selected test results

6.8.5 Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung – Detail 4

Joint in rib with full penetration butt weld with steel backing plate – Detail 4

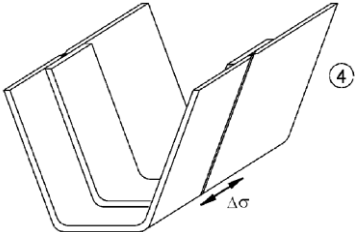
6.8.5.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung des Rippenstoßes mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-81 dargestellt.

Tabelle 6-81: Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-81: Joint in rib with full penetration butt weld with steel backing plate according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
71		Rippenstoß, voll durchgeschweißte Stumpfnah mit Badsicherung	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. Die Haftnah der Badsicherung ist nur innerhalb der späteren Stumpfnah zulässig

6.8.5.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung“ sind zahlreiche Quellen, Serien und Versuchsergebnisse vorhanden, wie Tabelle 6-82 zeigt.

Tabelle 6-82: Übersicht Datengrundlage: „Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung“

Table 6-82: Overview database: “Joint in rib with full penetration butt weld with steel backing plate”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	138
Anzahl Quellen	10
Anzahl Serien	30

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung“ ist in Bild 6-183 zu erkennen. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

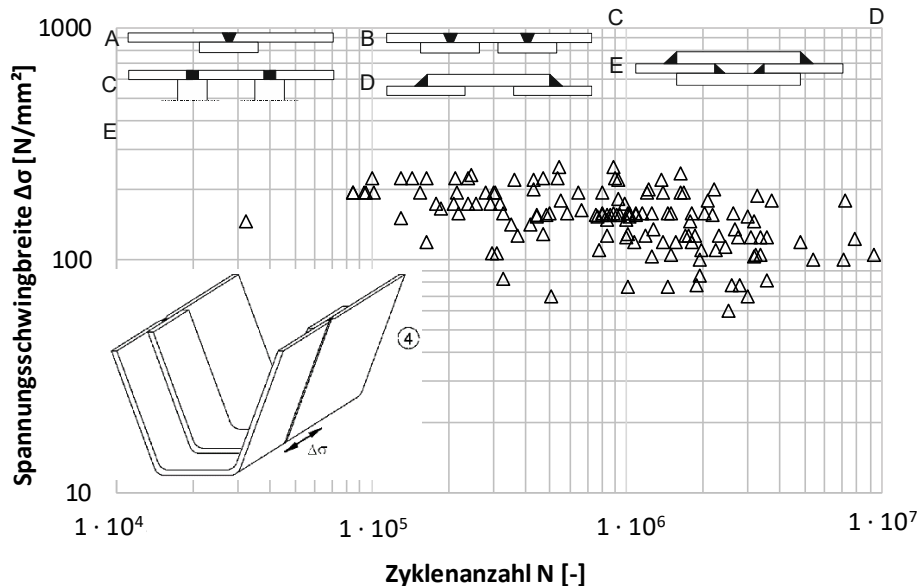


Bild 6-183: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung“ #342 #343 #345 #346 #347 #348 #350 #351 #352 #373

Figure 6-183: Illustration of experimental fatigue data for detail “joint in rib with full penetration butt weld with steel backing plate”

6.8.5.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Bild 6-184 zeigt einen Ermüdungsriss an einem Rippenstoß. In #342, #343, #345, #347 und #351 wurde die Rissinitiierung an der Wurzel festgestellt. Es kommen aber auch Risse an Schweißnahtübergängen vor #345 #346. Die Risse entstanden teilweise am geraden Stück des Rippenstegs, nicht an der stärker beanspruchten Spitze der Rippe #342. In #344 lag der Bruchausgang allerdings in der Rundung der Rippe. Die Autoren führen dies auf das Aufeinandertreffen der Schweißnähte in den Rundungen der Rippen zurück.

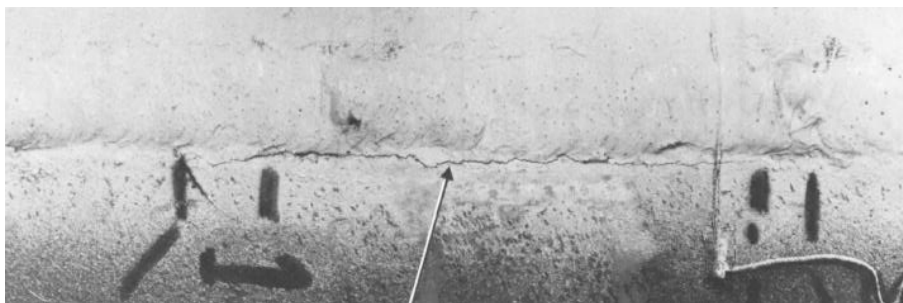


Bild 6-184: Probekörper mit Ermüdungsriss #342

Figure 6-184: Specimen with fatigue cracks #342

Bei Untersuchungen aus #345, #346, 347 und #351 wuchs der Riss am unteren Ende der Rippe von der Wurzel nach außen. Bei einigen Versuchen war der Rissausgangspunkt eine Haftnaht der Badsicherung, die nicht in der Stumpfnah lag #346.

6.8.5.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

In #343 ist dokumentiert, dass die Blechdicke und die Schweißposition keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben. Laut #345, #346 und #352 ist ein Einfluss der Schweißposition zu erkennen: in Überkopfposition (PD) gefertigte Proben weisen häufiger Imperfektionen auf, die zu einer geringeren Ermüdungsfestigkeit führen können #345.

Eine Ausmitte zwischen den zu verbindenden Rippen führt ebenfalls zu einer geringeren Ermüdungsfestigkeit #345 #346. Ein Mittelspannungseinfluss kann in einigen Studien festgestellt werden #343 #346 #350 #352. Dabei spielen die Eigenspannungen eine große Rolle, die von der Schweißfolge abhängen #346. In #345, #346, #347, #348 und #352 wurde eine Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit von der Größe des Wurzelspalts g festgestellt: Je kleiner der Wurzelspalt ist, desto schwieriger ist es, eine volle Durchschweißung zu erreichen. Derartige Proben weisen eine geringere Ermüdungsfestigkeit auf. Die Art der Schweißnaht (HV- oder V-Form) scheint keinen signifikanten Einfluss zu haben #347 #348. Auch hat der Schweißprozess keine Auswirkung #351. Anschlüsse mit Kehlnähten weisen eine geringere Ermüdungsfestigkeit auf #348 #352.

6.8.5.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Unter den verschiedenen Versuchsserien zum Rippenstoß mit Badsicherung finden sich verschiedene Ausführungen, siehe Bild 6-185.

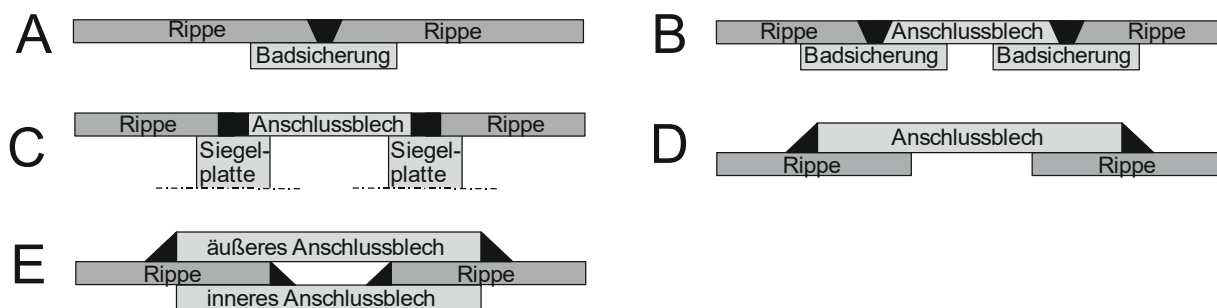


Bild 6-185: Verschiedene Ausführungen des Rippenstoßes mit Badsicherung

Figure 6-185: Different designs of joint in rib with steel backing plate

Dabei stellt Ausführungsform A den klassischen Fall dar. Bei Variante B wird der Rippenstoß durch zwei Einzelstöße ausgeführt, wobei zwischen den Rippen ein Anschlussblech positioniert wird. Variante C ähnelt diesem Fall, wobei hier statt einer Badsicherung eine Siegelplatte verwendet wird. Fall D und E sind Detail 4 dem Kerbfallkatalog nicht zugehörig, da hier Anschlussbleche mit Kehlnähten verwendet werden. Dennoch existieren zu diesen beiden Ausführungsvarianten Ermüdungsversuche, die in diesem Abschnitt ebenfalls evaluiert werden. In Variante E wird im Vergleich zu Fall D auf beiden Seiten der Rippen ein Anschlussblech angeschweißt.

Zunächst werden in der Auswertung Serien mit Ausführungsvariante A und B betrachtet. Wie in Abschnitt 6.8.5.4 erläutert wurde, hat der Wurzelspalt g einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Bei der Auswertung wurden aus diesem Grund drei Kategorien eingeführt:

- a) $0 \leq g \leq 4 \text{ mm}$
- b) $4 < g \leq 6 \text{ mm}$
- c) $g > 6 \text{ mm}$

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 45 für Fall a), Kerbfall 69 für Fall b) und Kerbfall 76 für Fall c), siehe Bild 6-186 und Bild 6-187 (links).

Die derzeit gültige Kerbfallklasse in DIN EN 1993-1-9 [1] ist Klasse 71 und unabhängig von der Größe des Wurzelspalts. Wie die Ergebnisse jedoch zeigen, spielt die Abhängigkeit des Kerbfalls von der Größe des Wurzelspalts eine große Rolle.

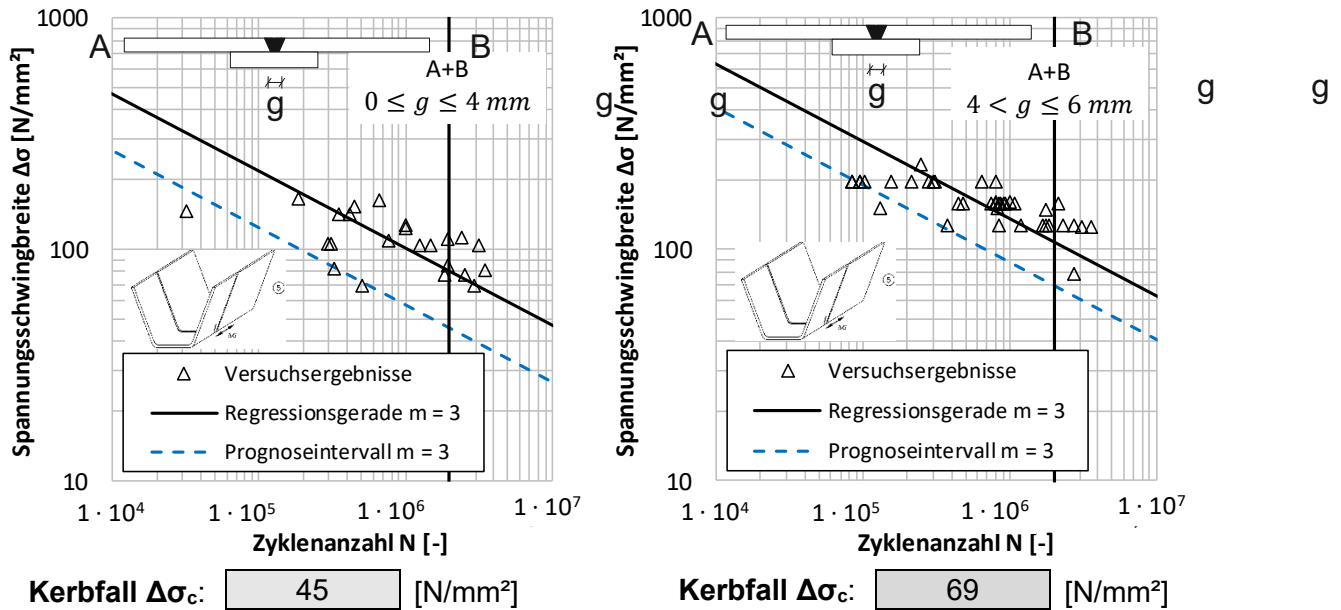


Bild 6-186: Kerbfallableitung „Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung“ Variante A und B mit $0 \leq g \leq 4 \text{ mm}$ (links) und $4 < g \leq 6 \text{ mm}$ (rechts) anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #345 #346 #347 #348 #351 #352)

Figure 6-186: Fatigue classification of „joint in rib with full penetration butt weld with steel backing plate“ design A and B with $0 \leq g \leq 4 \text{ mm}$ (left) and $4 < g \leq 6 \text{ mm}$ (right) based on selected test results

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse für Ausführungsvariante C liefert Kerbfall 137, welcher deutlich über der derzeit gültigen Kerbfallklasse 71 in DIN EN 1993-1-9 [1] liegt, siehe Bild 6-187 (rechts).

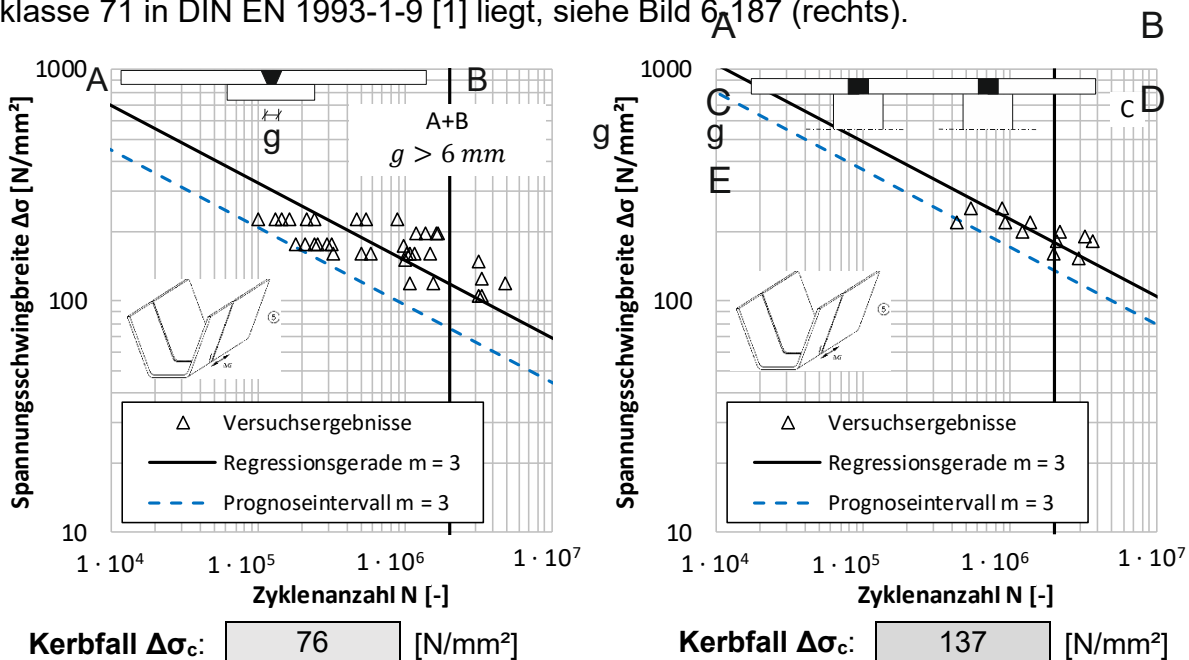
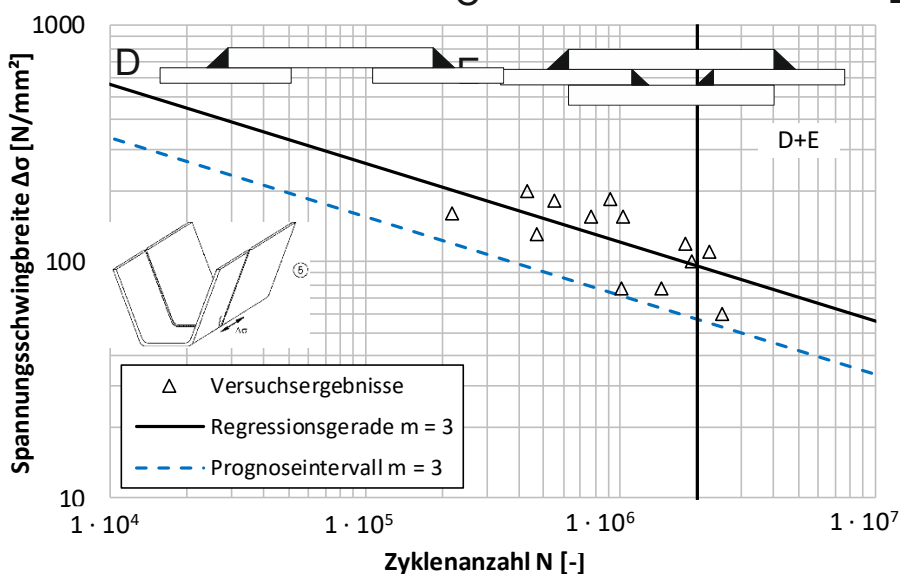


Bild 6-187: Kerbfallableitung „Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung“ Variante A und B mit $g > 6 \text{ mm}$ (links) und Variante C (rechts) anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #342 #345 #346 #350)

Figure 6-187: Fatigue classification of „joint in rib with full penetration butt weld with steel backing plate“ design A and B with $g > 6 \text{ mm}$ (left) and design C(right) based on selected test results

Aufgrund der geringen Anzahl an Versuchsdaten wurden die Ausführungsvarianten D und E gemeinsam ausgewertet.

A
C
E



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 57 [N/mm²]

Bild 6-188: Kerbfalleableitung „Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung“ Variante D und E anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #373)

Figure 6-188: Fatigue classification of „joint in rib with full penetration butt weld with steel backing plate“ design D and E based on selected test results

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse für Ausführungsvariante D und E, welche bisher im Kerbfalkatalog der DIN EN 1993-1-9 [1] nicht enthalten sind, liefert Kerbfall 57, siehe Bild 6-188 (rechts).

6.8.6 Von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung – Detail 5

Full penetration butt weld in rib welded from both sides without backing plate – Detail 5

6.8.6.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der von beiden Seiten voll durchgeschweißten Stumpfnah ohne Badsicherung nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-83 dargestellt. Die Kerbfälle entsprechen denjenigen der Stumpfstoße aus Tabelle 8.3 [1], was die Kerbfälle selbst, den Größeneffekt und die Abhängigkeit der Kerbfälle von der Schweißnahtüberhöhung angeht.

Tabelle 6-83: Von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-83: Full penetration butt weld in rib welded from both sides without backing plate according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen
a) 112		Blechdickenabhängigkeit für $t > 25 \text{ mm}$: $k_s = \left(\frac{25}{t}\right)^{0,2}$ 	Von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung.	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
b) 90				
c) 80				

6.8.6.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung“ sind nur zwei Quellen bekannt, die jedoch einige Versuchsergebnisse enthalten, wie Tabelle 6-84 zeigt.

Tabelle 6-84: Übersicht Datengrundlage: „von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung“

Table 6-84: Overview database: “full penetration butt weld in rib welded from both sides without backing plate”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	38
Anzahl Quellen	2
Anzahl Serien	2

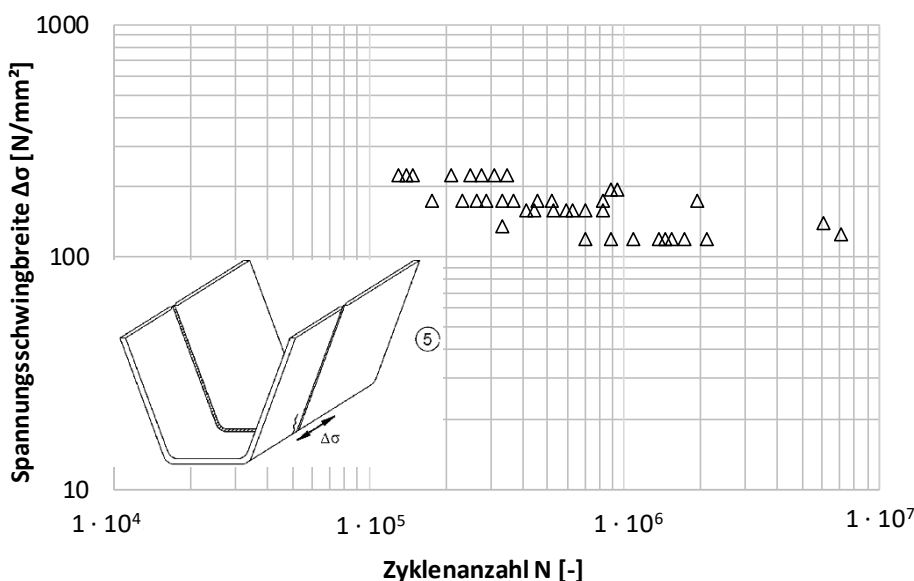


Bild 6-189: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung“ #350 #368

Figure 6-189: Illustration of experimental fatigue data for detail “full penetration butt weld in rib welded from both sides without backing plate”

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung“ ist in Bild 6-189 zu erkennen. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

6.8.6.3 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

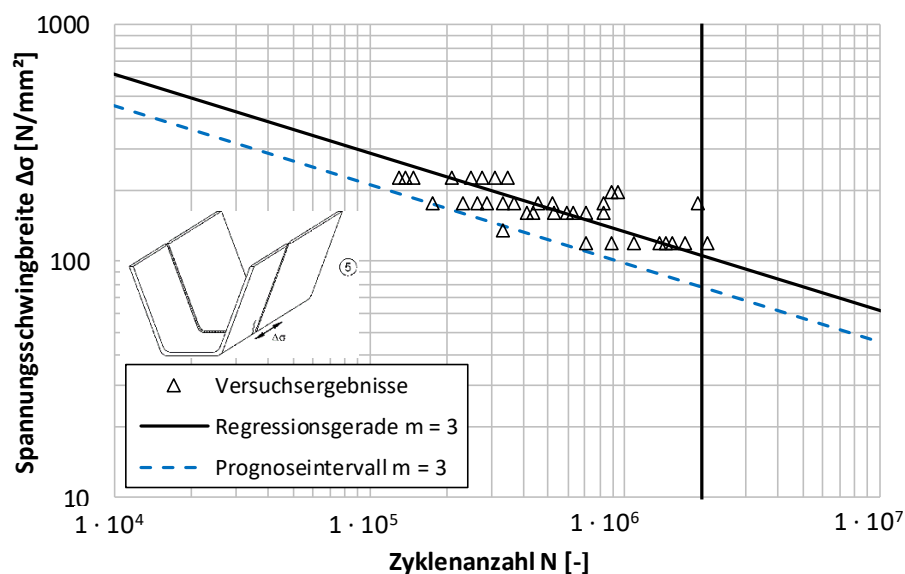
Significant influence parameters on the resistance side

In #350 zeigte sich, dass die Ermüdungsfestigkeit von Großproben etwas geringer zu sein scheint als die von Kleinproben. Die Autoren führen dies auf die höheren Eigenspannungen in großmaßstäblichen orthotropen Platten zurück.

6.8.6.4 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Bild 6-190 zeigt die Auswertung des Details 5.



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 78 [N/mm²]

Bild 6-190: Kerbfallableitung „von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #350 #368)

Figure 6-190: Fatigue classification of „full penetration butt weld in rib welded from both sides without backing plate“ based on selected test results

In den vorhandenen Quellen ist die Überhöhung der Schweißnaht nicht dokumentiert #350. In einer Zeichnung #350 lässt sich erkennen, dass eine Überhöhung vorhanden ist, sodass die Versuchsergebnisse entweder Fall b) oder Fall c) zuzuordnen sind. Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 78 und bestätigt damit die derzeit gültige Kerbfallklasse 80 für Fall c) in DIN EN 1993-1-9 [1]. Der Größeneffekt, welcher von den klassischen Stumpfstößen auf Tabelle 8.3 der Norm [1] herrührt, kann nicht untersucht werden, da alle Probekörper eine Dicke von 6 mm aufweisen.

6.8.7 Kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten – Detail 6

Critical section in web of cross girder due to cut outs – Detail 6

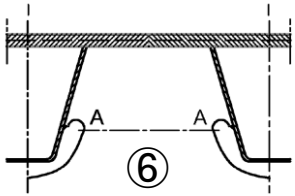
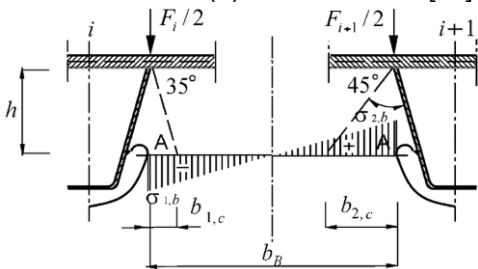
6.8.7.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung des kritischen Schnitts im Querträgersteg mit Ausschnitten nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-85 dargestellt.

Tabelle 6-85: Kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-85: Critical section in web of cross girder due to cut outs according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
71 (112)		Kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite im kritischen Schnitt unter Berücksichtigung von Vierendeel Effekten zu führen. Wird die Spannungsschwingbreite nach EN 1993-2 [13] 9.4.2.2(3) ermittelt, darf Kerbfall 112 verwendet werden
Abschnitt 9.4.2.2 (3) der EN 1993-2 [13] beinhaltet folgende Abbildung:			
		Zur Erläuterung der Größen σ_1 und σ_2 siehe [102].	

6.8.7.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten“ ist eine geringe Anzahl an Quellen, Serien und Versuchsergebnisse vorhanden, wie Tabelle 6-86 zeigt.

Tabelle 6-86: Übersicht Datengrundlage: „kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten“

Table 6-86: Overview database: “critical section in web of cross girder due to cut outs”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	12
Anzahl Quellen	5
Anzahl Serien	6

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten“ ist in Bild 6-191 zu erkennen. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

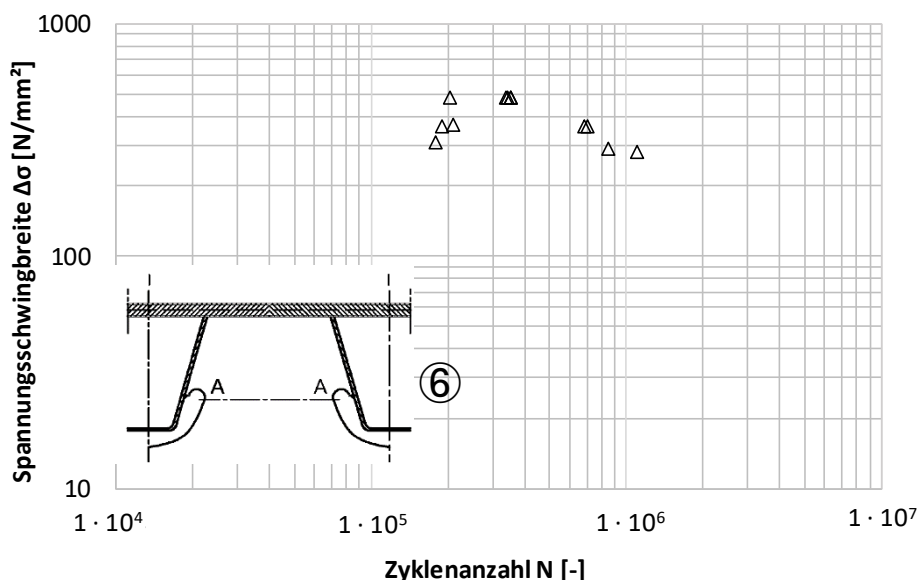


Bild 6-191: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten“ #343 #358 #359 #360 #365

Figure 6-191: Illustration of experimental fatigue data for detail “critical section in web of cross girder due to cut outs”

6.8.7.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Risse entstanden an freien Kanten des Ausschnitts oder an Schweißnahtenden #358 #359 #365. Bei Untersuchungen in #360 scheint die Kante am Ausschnitt kritischer als das Schweißnahtende zu sein. Ferner kommen Risse auch an druckbeanspruchten Kanten vor #343 #358 #359, welches durch das Vorhandensein von großen Eigenspannungen erklärt wird. Diese Risse wachsen gleichwohl langsamer, als jene im Zugbereich #358.

6.8.7.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

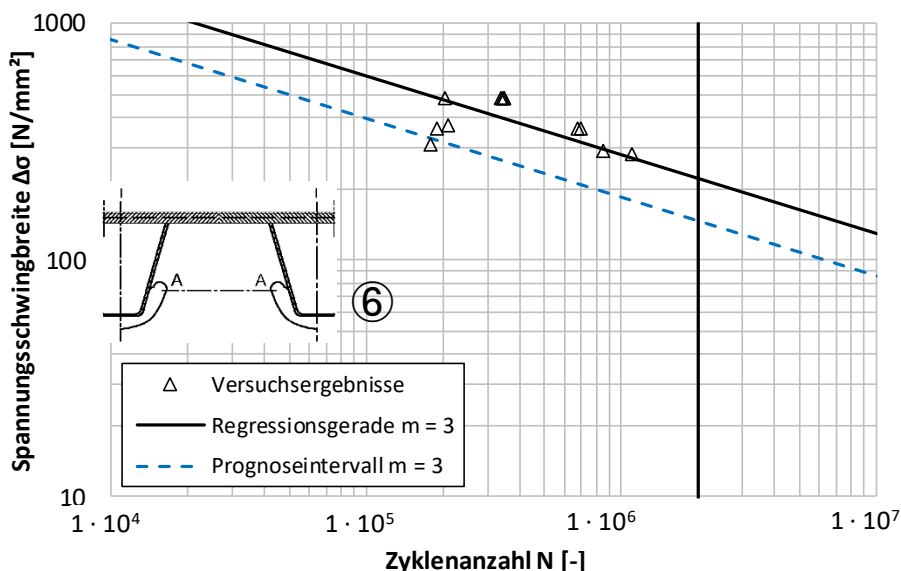
Significant influence parameters on the resistance side

Laut Voruntersuchungen von #343 und Untersuchungen aus #358 und #359 habe die Form des Ausschnitts einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Die Radien des Ausschnitts sind relevant #359. Durch die in Tabelle 6-85 dargestellte Form der Ausnehmung werden geometrische Kerben und Schweißkerben getrennt, sodass hohe Ermüdungsfestigkeitswerte erreicht werden können #343. Durch die in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen hat sich die derzeit im Kerbfallkatalog dargestellte Form der Ausnehmung bewährt und gegenüber früheren Formen durchgesetzt. Ferner regulieren laut #358 und #359 vor allem Eigenspannungen die Rissentwicklung dieses Details.

6.8.7.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Bei einer Versuchsserie dieses Details traten lediglich Durchläufer auf, bzw. es wurden keine konstanten Amplituden aufgebracht. Alle übrigen Serien wurden zur Auswertung herangezogen. Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 147 (siehe Bild 6-192) und liegt damit deutlich oberhalb der derzeit gültigen Kerbfallklasse 71, bzw. 112 in DIN EN 1993-1-9 [1].



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 147 [N/mm²]

Bild 6-192: Kerbfalleitung „kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #358 #359 #360 #365)

Figure 6-192: Fatigue classification of „critical section in web of cross girder due to cut outs“ based on selected test results

6.8.8 Versenkte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe – Detail 7

Partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib – Detail 7

6.8.8.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der versenkten Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-87 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass der horizontale Spalt zwischen Rippe und Deckblech maximal 2 mm betragen darf. Der vertikale, von der versenkten Naht nicht erfasste Spalt muss ebenfalls kleiner als 2 mm sein. Des Weiteren erkennt man anhand der Zeichnung, dass die Kanten der Rippe nicht bearbeitet sind und somit nicht bündig am Deckblech anliegen.

Tabelle 6-87: Versenkte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-87: Partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
71		Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe: Versenkte Naht mit $a \geq t$	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite infolge Blechbiegung zu führen: $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_w}{W_w}$ W_w ist mit t zu berechnen

6.8.8.2 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „versenkte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe“ sind zahlreiche Serien und Versuchsergebnisse vorhanden, wie Tabelle 6-88 zeigt.

Tabelle 6-88: Übersicht Datengrundlage: „versenkte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe“

Table 6-88: Overview database: “partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	72
Anzahl Quellen	6
Anzahl Serien	16

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „versenkte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe“ ist in Bild 6-193 zu erkennen. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

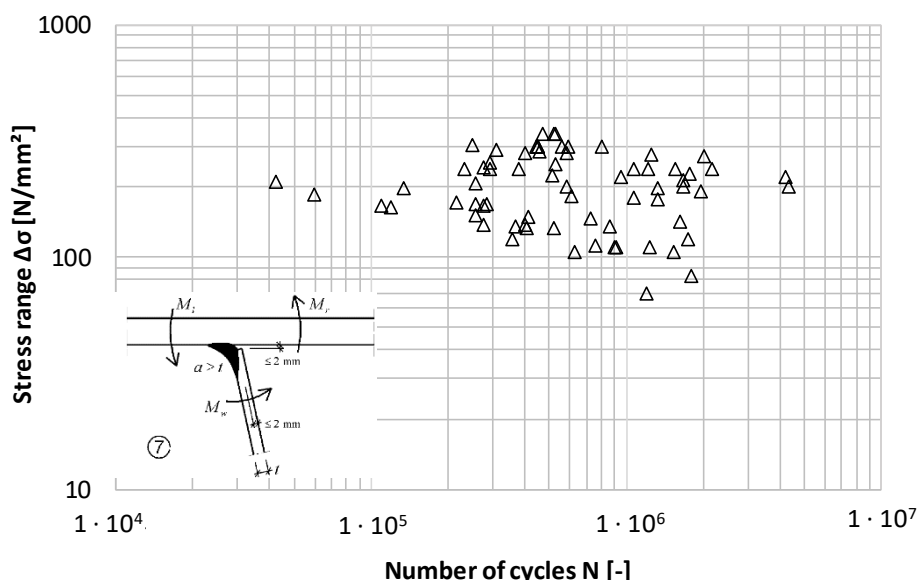


Bild 6-193: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „versenkte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe“ #55 #331 #335 #336 #337 #368

Figure 6-193: Illustration of experimental fatigue data for detail “partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib”

6.8.8.3 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Bei diesem Detail kommen Risse im Deckblech am Schweißnahtübergang #331 #336 oder an der der Schweißnahtwurzel vor #331. Diese wachsen nachfolgend durch das Deckblech.

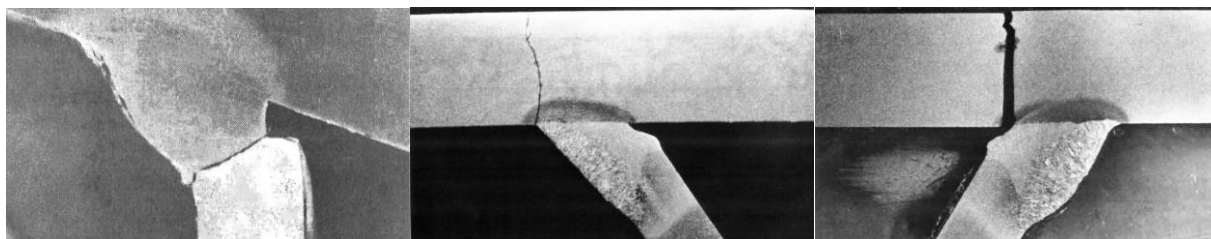


Bild 6-194: Probekörper mit Ermüdungsriss in der Rippe #55, im Deckblech am Schweißnahtübergang #331 und im Deckblech an der Schweißnahtwurzel #331 (v.l.n.r.)

Figure 6-194: Specimen with fatigue cracks in rib #55 in deck plate at weld toe #331 and in deck plate at weld root #331 (f.l.t.r.)

Ferner kommen Risse in Abhängigkeit der Belastung auch in der Rippe vor #331. Des Weiteren werden auch Risse in der Schweißnaht dokumentiert, die von der Wurzel ausgehen #331 #336. Bild 6-194 zeigt Beispiele dieser Versagensarten.

6.8.8.4 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

In #331 wurden verschiedene Belastungsszenarien untersucht, die einen Einfluss auf den Versagensmechanismus und die Ermüdungsfestigkeit haben. Eine Zugbeanspruchung scheint kritischer als eine Biegebelastung zu sein. In #331 scheint kein Mittelspannungseinfluss vorhanden zu sein, während dieser bei #336 von Wichtigkeit zu sein scheint. Die Schubbeanspruchung der Schweißnaht scheint keinen Einfluss auf das Versagen zu haben #331. Einen entscheidenden Einfluss auf den Versagensmechanismus hat laut #331 der horizontale Spalt zwischen Rippe und Deckblech. Je größer der Spalt ist, desto eher tritt ein Versagen in der Schweißnaht und weniger im Deckblech auf #331. Jedoch ist in #336 und #337 dokumentiert, dass die Größe des horizontalen Spalts sich nicht auf die Ermüdungsfestigkeit auswirkt. Bei Untersuchungen in #335 spielte die Größe der fehlenden Durchschweißung, sowie die Schweißposition keine signifikante Rolle. Allerdings hat die Größe der fehlenden Durchschweißung bei Untersuchungen in #337 einen Einfluss auf den Versagensmechanismus und somit die Ermüdungsfestigkeit: Je größer die fehlende Durchschweißung ist, desto wahrscheinlicher wird ein kritischeres Wurzelversagen. In #336 und #337 ist dokumentiert, dass automatisch hergestellte Schweißnähte durch einen tieferen Einbrand und größere Schweißnahtmaße eine größere Ermüdungsfestigkeit besäßen #336.

6.8.8.5 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Wie in Abschnitt 6.8.8.4 beschrieben ist, hängt die Ermüdungsfestigkeit entscheidend vom Versagensort ab, sodass dieser bei der Kerbfallableitung betrachtet werden muss. Zunächst wird eine Kerbfallableitung für ein Versagen an der Rippe durchgeführt, wobei hier die Rippe Ort der Spannungsberechnung ist. Es wurden zwei Serien aussortiert, bei denen die Größe der fehlenden Durchschweißung über 4 mm betrug. Alle weiteren Serien wurden in die Auswertung einbezogen. Ferner wurden alle Serien ausgewertet, bei denen ein Versagen im Deckblech ausgehend vom Schweißnahtübergang oder der Schweißnahtwurzel auftrat. Die einwirkende Spannung wurde dabei auf das Deckblech bezogen. Bild 6-195 zeigt die beiden Auswertungen.

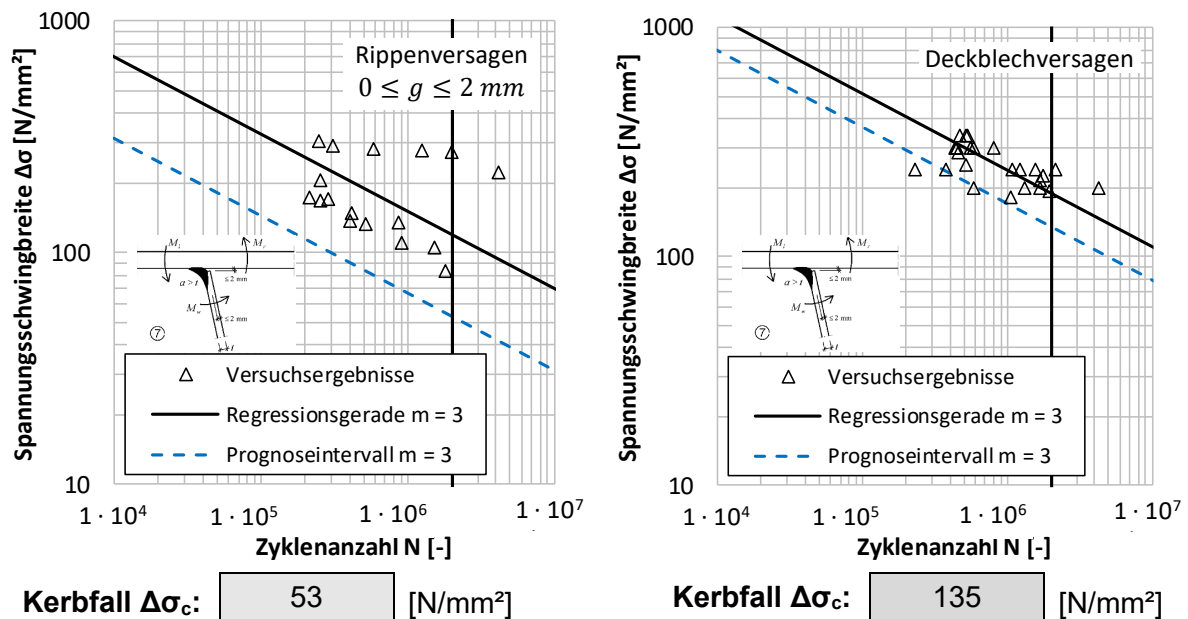


Bild 6-195: Kerbfalleitung „versenkte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe“ Rippenversagen mit $0 \leq g \leq 2 \text{ mm}$ (links) und Deckblechversagen (rechts) anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #55 #331 #335 #336 #337)

Figure 6-195: Fatigue classification of “partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib“ rib failure with $0 \leq g \leq 2 \text{ mm}$ (left) and deck plate failure (right) based on selected test results

Ein „Wurzelversagen“ kommt ausschließlich bei Prüfkörpern vor, die eine fehlende Durchschweißung aufweisen, welche größer als 2 mm ist. Auf Basis der bekannten Daten kommt ein Wurzelversagen daher bei Verbindungen, die Detail 7 mit einer fehlenden Durchschweißung bis 2 mm angehören, nicht vor. Im derzeitigen Kerbfalkatalog der DIN EN 1993-1-9 [1] wird nicht nach Versagensorten differenziert. Hier wird lediglich Kerbfall 71 für ein Versagen der Rippe angegeben, was oberhalb des hier ausgewerteten Kerbfalls von 53 liegt. Ein Kerbfall für das Versagen des Deckblechs sollte ergänzt werden. Der Kerbfall liegt mit 135 recht hoch, wird aber vom Detail 7 derzeit nicht abgedeckt.

6.8.9 Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe – Detail 8

Fillet weld or partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib – Detail 8

6.8.9.1 Übersicht

Overview

Die Kerbfalleinstufung der Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißten Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist in Tabelle 6-89 dargestellt. Hier ist zu beachten, dass der horizontale Spalt zwischen Deckblech und Rippe nur 0,5 mm (weniger als bei Detail 7) betragen darf. Ferner erkennt man anhand der Zeichnung, dass die Kanten der Rippe bearbeitet sind und bündig am Deckblech anliegen.

Tabelle 6-89: Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-89: Fillet weld or partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
50		<p>Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe: Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht, wenn nicht durch Kerbfall 7) abgedeckt</p>	<p>Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite infolge Blechbiegung zu führen: $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_w}{W_w}$ W_w ist mit a zu berechnen</p>

6.8.9.2 Abgrenzung zu Detail 8

Differentiation from Detail 8

Die Unterschiede zwischen Detail 8 und Detail 7 betreffen die Art der Schweißnaht, die Größe des horizontalen Spalts, die Größe der fehlenden Durchschweißung, den Zustand der Kanten und die Spannungsermittlung, vergleiche Tabelle 6-87 und Tabelle 6-89.

6.8.9.3 Verfügbare experimentelle Versuchsdaten

Available experimental test data

Für das Detail „Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe“ sind einige Quellen, Serien und Versuchsergebnisse vorhanden, wie Tabelle 6-90 zeigt.

Tabelle 6-90: Übersicht Datengrundlage: „Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe“

Table 6-90: Overview database: “Fillet weld or partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib”

	Anzahl
Wöhlerversuche insgesamt	33
Anzahl Quellen	2
Anzahl Serien	6

Die Darstellung aller Wöhlerversuche mit konstanter Amplitude am Konstruktionsdetail „Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe“ ist in Bild 6-196 zu erkennen. Es werden alle dem Konstruktionsdetail zugeordneten Daten ohne weitere Unterteilung dargestellt.

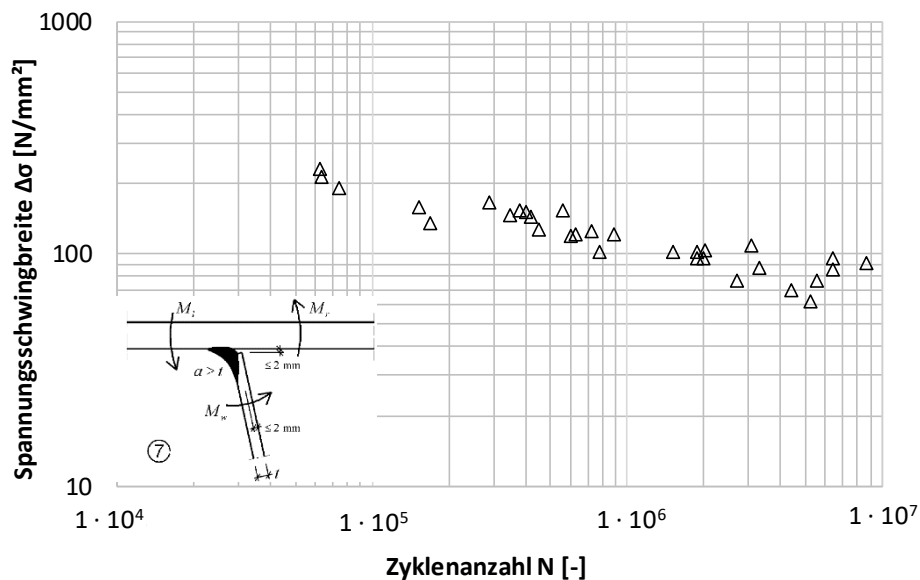


Bild 6-196: Darstellung aller Versuchspunkte zum Konstruktionsdetail „Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe“ #56 #331

Figure 6-196: Illustration of experimental fatigue data for detail “Fillet weld or partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib”

6.8.9.4 Versagensmerkmale

Failure characteristics

Bild 6-197 zeigt einen Ermüdungsris, der von der Schweißnahtwurzel ausgeht.

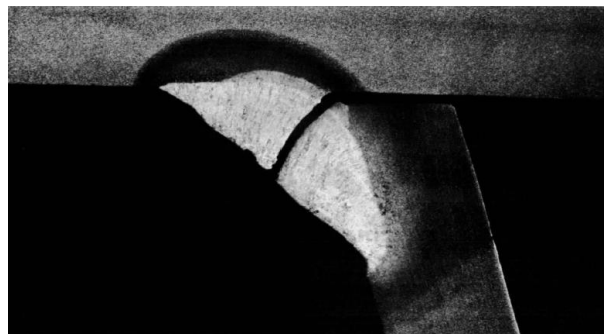


Bild 6-197: Probekörper mit Ermüdungsris #56

Figure 6-197: Specimen with fatigue cracks #56

Laut #55 und #331 beginnen die Risse bei diesem Detail an der Schweißnahtwurzel und wachsen durch die Dicke der Schweißnaht bis zur Oberfläche.

6.8.9.5 Signifikante Einflussparameter auf der Widerstandsseite

Significant influence parameters on the resistance side

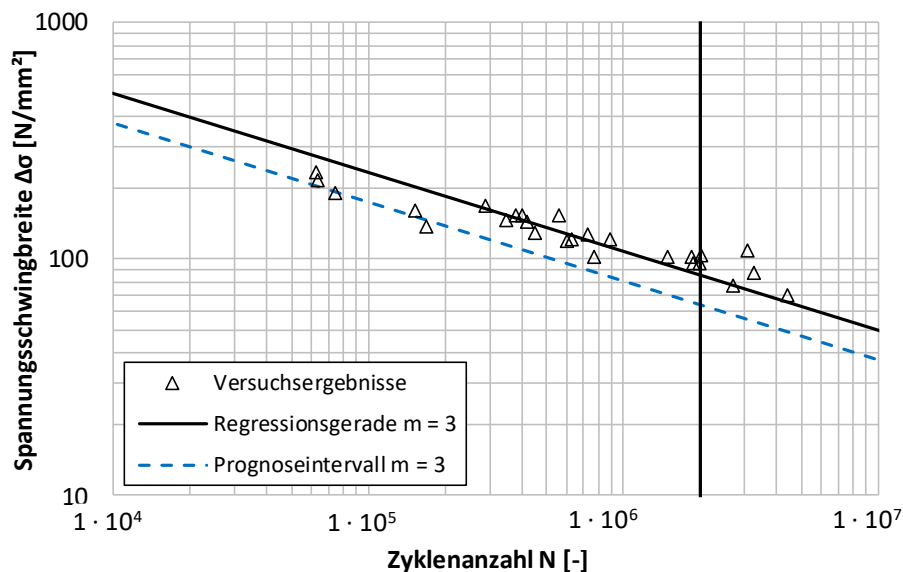
Viele Einflussparameter wurden bei diesem Detail nicht untersucht. Es kann jedoch festgehalten werden, dass Eigenspannungen einen Einfluss auf den Versagensmechanismus und die Ermüdungsfestigkeit haben #56. Ein genereller Mittelspannungseinfluss konnte bei den Untersuchungen in #331 allerdings nicht festgestellt werden.

6.8.9.6 Kerbfallableitung an ausgewählten Quellen

Fatigue class derivation by selected sources

Alle vorhandenen Serien wurden in die Auswertung einbezogen. Bei allen Serien trat ein Versagen durchweg an der Schweißnahtwurzel auf.

Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungsergebnisse liefert Kerbfall 64 (siehe Bild 6-198) und liegt damit etwas unterhalb der derzeit gültigen Kerbfallklasse 71 in DIN EN 1993-1-9 [1].



Kerbfall $\Delta\sigma_c$: 64 [N/mm²]

Bild 6-198: Kerbfallableitung „Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe“ anhand gefilterter Versuchsergebnisse (Quellen IDs: #55 #331)

Figure 6-198: Fatigue classification of „Fillet weld or partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib“ based on selected test results

6.9 Orthotrope Platten mit offenen Rippen – Tabelle 8.9

Orthotropic decks – open stringers – Table 8.9

6.9.1 Übersicht

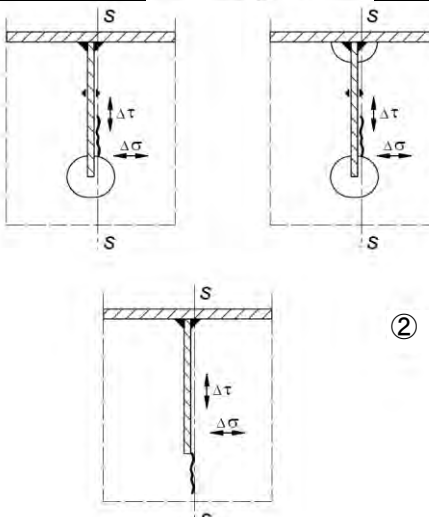
Overview

Die Tabelle 8.9 der DIN EN 1993-1-9 [1] befasst sich mit orthotropen Platten mit offenen Rippen, wobei ausschließlich der Anschluss der Längsrippe an den Querträger behandelt wird. Die Tabelle beinhaltet lediglich zwei Details, zu denen im Hintergrunddokument der Norm keine Quellen und Versuchsserien oder Ermüdungsversuche bekannt sind [4]. Die Details ähneln ferner denen der Tabelle 8.8. Aus diesen Gründen wird der Hintergrund dieser Tabelle anhand eines Normenvergleichs mit den Vorgängerdokumenten [103, 104, 105, 106] der heutigen EN1993-1-9 [1] geklärt.

Tabelle 6-91 zeigt die aktuelle Details der DIN EN 1993-1-9 [1] zum Anschluss einer Längsrippe an den Querträger.

Tabelle 6-91: Details zum Anschluss einer Längsrippe an den Querträger nach DIN EN 1993-1-9

Table 6-91: Details of a connection of longitudinal stringer to cross girder according to DIN EN 1993-1-9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
80	$t \leq 12mm$	Anschluss einer Längsrippe an den Querträger.	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe infolge Biegung zu führen.
71	$t > 12mm$		
56		<p>Anschluss einer durchgehenden Längsrippe an den Querträger.</p> $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_s}{W_{net,s}}$ $\Delta\tau = \frac{\Delta V_s}{A_{w,net,s}}$ <p>Spannungsschwingspiele zwischen den Längsrippen sind ebenfalls entsprechend EN 1993-2 nachzuweisen.</p>	<p>Der Nachweis ist mit der Kombination der Spannungsschwingbreite $\Delta\tau$ infolge Querkraft und der Spannungsschwingbreite infolge Biegung $\Delta\sigma$ im Querträgersteg mit einer äquivalenten Spannungsschwingbreite zu führen:</p> $\Delta\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\Delta\sigma + \sqrt{\Delta\sigma^2 + 4\Delta\tau^2} \right)$

Bei der Betrachtung der Details fällt zunächst auf, dass Detail 1 den Nachweis der Rippe umfasst, während sich Detail 2 auf den Querträgersteg bezieht. Dies führt dazu, dass die Ansichten unterschiedlich sind: Bei Detail 1 soll der Querträger im Querschnitt zu sehen sein, während die Rippe in der Ansicht zu betrachten ist. Bei Detail 2 erkennt man hingegen die Rippe im Querschnitt und den Querträger in der Ansicht.

Detail 1 beschränkt sich auf eine nicht durchgehende Rippe, während bei Detail 2 eine durchgehende Rippe vorausgesetzt wird. Dementsprechend fehlt das Detail zum Nachweis der Rippe im Fall einer durchgehenden Rippe. Ferner beschreibt das Detail 1 der Tabelle 8.9 also eine am Querträgersteg gestoßene Rippe. Verglichen mit den Kerbfällen der geschlossenen Rippen, siehe Abschnitt 6.8, entspräche das Detail 1 der Tabelle 8.9 „Anschluss einer [offenen] Längsrippe an den Querträger“ dem Detail 3 der Tabelle 8.8 „[Hohle] Längsrippen am Querträger stoßen“, siehe Abschnitt 6.8. Die Kerbfälle dieser Details unterscheiden sich jedoch erheblich: Während bei der geschlossenen Rippe Kerbfall 36 angesetzt wird, wird bei der offenen Rippe je nach Dicke des Querträgers Kerbfall 80 oder 71 vorgeschrieben. Diese Kerbfalleinteilung findet man allerdings genau in dieser Form bei den Details 1 und 2 der Tabelle 8.8, die „durchgehenden Längsrippen“, siehe Abschnitt 6.8.2 und 0. Dieser Divergenz soll mithilfe des Vergleichs der Vorgängernormen untersucht werden.

6.9.2 Anschluss der Längsrippe and den Querträger laut ENV 1993-2

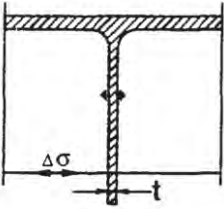
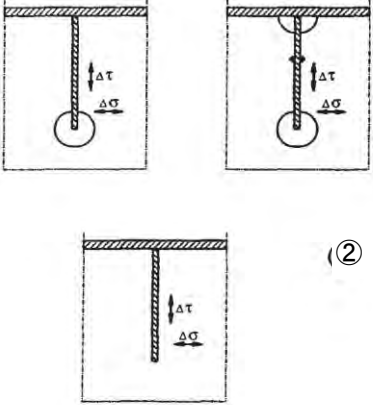
Connection of longitudinal stringer according to ENV 1993-2

Da die Details der Tabelle 8.9 im Brückenbau vorkommen, war deren Ermüdungsbemessung vor Einführung der DIN EN 1993-1-9 [1] in den Regelungen zum Stahlbrückenbau

verankert. In der ENV 1993-2 [103] aus dem Jahre 2001, der Vornorm zur heutigen Brückenbaunorm, sind wie in der heutigen Form der Tabelle 8.9 zwei Details vorhanden, die den aktuellen Details sehr ähneln, siehe Tabelle 6-92.

Tabelle 6-92: Details zum Anschluss einer Längsrippe an den Querträger nach ENV 1993-2

Table 6-92: Details of a connection of longitudinal stringer to cross girder according to ENV 1993-2

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen
80	$t \leq 12mm$		Anschluss einer durchgehenden Längsrippe an den Querträger.	Der Nachweis ist abhängig von der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe infolge Biegung zu führen.
71	$t > 12mm$			
56			Anschluss einer durchgehenden Längsrippe an den Querträger.	Der Nachweis ist abhängig von der Kombination der Spannungsschwingbreite $\Delta\tau$ infolge Querkraft und der Spannungsschwingbreite infolge Biegung $\Delta\sigma$ in der Rippe zu eine äquivalenten Spannungsschwingbreite zu führen: $\Delta\sigma_{eq} = \sqrt{\Delta\sigma^2 + \Delta\tau^2}$

Bemerkenswert ist, dass die Kerbfalkategorien der ENV 1993-2 die gleichen sind, wie in heutigen Kerbfalkatalog (Tabelle 6-91), wobei es bei den Details gravierende Unterschiede gibt. Die Beschreibung zu Detail 1 betitelt hier eine „durchgehende Längsrippe“, wohingegen die Rippe in der aktuellen Version nicht als durchgehend bezeichnet wird. Der Kerbfall dieses Detail 1 für offene Rippen der ENV 1993-2 entspricht somit demjenigen des Details 2 der Tabelle 8.8 in den DIN EN 1993-1-9 [1].

Was Detail 2 angeht sollen in der ENV 1993-2 im Vergleich zum aktuellen Detail die Spannungskomponenten in der „Rippe“ und nicht im Querträgersteg bestimmt werden. Dies passt nicht zur Abbildung des Konstruktionsdetails, wo die Spannungskomponenten im Querträgersteg eingezeichnet sind. Ferner erfolgt die Berechnung der äquivalenten Spannung in der ENV 1993-2 etwas einfacher als in der aktuellen Variante. Die äquivalente Spannung laut DIN EN 1993-1-9 [1] liegt immer oberhalb derjenigen der ENV 1993-2 und hängt etwas stärker von der Schubspannung, als von der Normalspannung ab. Somit ist die aktuelle Regelung des Kerbfalkatalogs konservativ und die Spannungen scheinen sich auf die richtige Komponente, den Querträgersteg, zu beziehen.

Identische Details finden sich im Übrigen auch in der ersten und zweiten Ausgabe des alten DIN Fachberichts 103 von 2002 [104] und 2003 [105]. In [105] sind beim Detail 2 ausführliche Geometrieanforderungen zu Ausschnitten im Querträgersteg und Schweißnähten gegeben.

6.9.3 Anschluss der Längsrippe and den Querträger laut DIN Fachbericht 103

Connection of longitudinal stringer according to DIN Fachbericht 103

Im alten DIN Fachbericht 103 aus dem Jahre 2009 [106] sind ebenfalls wie in der heutigen Form der Tabelle 8.9 zwei Details vorhanden, die den aktuellen Details sehr ähneln, siehe Tabelle 6-93.

Tabelle 6-93: Details zum Anschluss einer Längsrippe an den Querträger nach DIN Fachbericht 103-2009

Table 6-93: Details of a connection of longitudinal stringer to cross girder according to DIN Fachbericht 103-2009

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen
80	$t \leq 12mm$		Anschluss einer durchgehenden Längsrippe an den Querträger. $\Delta\sigma$ in Höhe Anschlussnaht	Der Nachweis ist abhängig von der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
71	$t > 12mm$			
$\Delta\sigma$ 36 $\Delta\tau$ 80			Anschluss einer durchgehenden Längsrippe an den Querträger.	Es sind 2 Ermüdungsnachweise erforderlich: zum einen der Nachweis für die Schweißnahtwurzel gegen Abriss, Kerbgruppe 36* für σ_w und Kerbgruppe 80 für τ_w zum anderen Nachweis gegen Abriss am Nahtübergang mit Bestimmung der Spannungsschwingbreite in den belasteten Blechen.

Das Detail 1 ähnelt dabei sehr demjenigen aus der ENV 1993-2, siehe Abschnitt 6.9.2. Auch im DIN Fachbericht 103 von 2009 [106] besteht das Detail aus einer durchgehenden Längsrippe. Das Detail 2 wird allerdings im DIN Fachbericht 103 [106] etwas anders behandelt: Zur Nachweisführung und Bestimmung der Nachweiskomponenten wird auf das Detail des Kreuzstoßes mit Kehlnähten verwiesen. Für Längsspannungen ist folglich Detail 36* anzusetzen, wobei Kerbfall 80 für Schubspannungen angesetzt wird. Diese beiden Kerbfälle, die aus Tabelle 8.5 stammen (dort Detail 3 und Detail 8), beziehen sich allerdings auf ein Schweißnahtwurzelversagen. Die Abbildung des Details 2 in DIN Fachbericht 103 [106] suggeriert eine Spannungsberechnung im Querträgersteg und nicht in der Schweißnaht.

6.9.4 Fazit

Conclusion

Unter Berücksichtigung der Vorgängerdetails des aktuellen Kerbfalkatalogs können einige Feststellungen zum Hintergrund der Tabelle 8.9 gemacht werden:

- a) In vier Vorgängerversionen [103, 104, 105, 106] der DIN EN 1993-1-9 [1] handelt es sich bei Detail 1 um eine durchgehende offene Längsrippe. Die Kerbfälle 80 und 71 entsprechen denen des Details von durchgehenden Hohlrippen. Im jetzigen Kerbfalkatalog findet man die gleichen Kerbfälle, jedoch handelt es sich nicht mehr

um eine durchgehende Längsrippe, sondern um eine gestoßene. Der Kerbfall der gestoßenen Rippe ist allerdings bei der Hohlrippe mit 36* deutlich kritischer eingestuft.

- b) Das Detail der durchgehenden Längsrippe in Bezug auf einen Ermüdungsnachweis in der Rippe selbst fehlt durch die in a) erläuterten Gegebenheiten im heutigen Kerbfallkatalog.
- c) Die äquivalente Spannungsberechnung des Details 2 stellt gegenüber früheren Vorgehensweisen eine konservative Methode dar.

6.10 Obergurt- Stegblech Anschlüsse von Kranbahnträgern – Tabelle 8.10

Top flange to web junction of runway beams – Table 8.10

Die Tabelle 8.10 der DIN EN 1993-1-9 [1] befasst sich mit Details zum Obergurt-Stegblech Anschluss von Kranbahnträgern. Die Details ähneln sich stark und variieren lediglich in der Anschlussart des Obergurts an das Stegblech. Die Details der Tabelle 8.10 stellen aufgrund verschiedener Spannungskomponenten, die für die Ermüdungsfestigkeit eine Rolle spielen, komplexe Details da. Die Datenbasis zu Versuchen an diesen Details ist sehr begrenzt. Ferner wurden in den wenigen experimentellen Untersuchungen zu diesen Details unterschiedliche Spannungskomponenten für die Nennspannung angesetzt, sodass eine Kerbfallableitung auf Basis von Nennspannungen erschwert wird. Zwei der im Projekt beteiligten Forschungsstellen haben allerdings kürzlich ausführliche Untersuchungen zu den Details der Tabelle 8.10. durchgeführt.

Euler untersuchte die Ermüdungsfestigkeit von Kranbahnträgern mit nicht durchgeschweißter Flansch-Steg-Verbindung durch eine Kombination aus Ermüdungsversuchen mit überrollender und ortsfest schwellender Radlast [107, 108]. Die Versuchskörper besaßen eine Flansch-Steg-Verbindung in Form einer Doppelkehlnaht mit tiefem Einbrand. Mithilfe der Versuche und ergänzender numerischer Simulationen konnte über das Nennspannungs- sowie das Kerbspannungskonzept eine Neuauswertung der nicht durchgeschweißten Konstruktionsdetails mit Radlasteinleitung erfolgen. Dabei entstanden Kerbfallableitungen, welche die aktuellen Festigkeitsansätze nach DIN EN 1993-1-9 [1] um mehr als 100 % übertreffen.

Ferner wurden von Citarelli Untersuchungen an in der Praxis bereits eingebauten und beanspruchten Kranbahnträgern deutscher Stahlwerke vorgenommen [109, 110]. Bei jenen Untersuchungen wurde eine große Anzahl von Durchläufern in die Datenbasis aufgenommen, welche mit einem Anteil von über 95 % qualitativ ein gutmütiges Ermüdungsverhalten der Kranbahnträger aufzeigen. Quantitativ wurden diese Daten mit Hilfe eines alternativen statistischen Auswerteverfahrens auf Grundlage der Maximum-Likelihood-Methode erfasst. Bei begleitenden numerischen Simulationen wurden zusätzlich lokale Bemessungskonzepte angewandt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen schließen eine Versuchslücke, welche in die Kerbfallempfehlungen der Tabelle 8.10 einfließt.

In beiden zuvor erläuterten Untersuchungsansätzen sind Kerbfallempfehlungen entstanden, die in Abschnitt 0 aufgegriffen werden.

7 Experimentelle Untersuchungen zum Gurtlamellenende

Experimental investigations for transverse end welds of cover-plates

Kurzfassung

Im Brückenbau werden Gurtlamellen für die Verstärkung von Trägern eingesetzt, um die Momententragfähigkeit in hoch beanspruchten Bereichen an den tatsächlichen Momentenverlauf anzupassen. Die bereichsweise aufgeschweißten Lamellen ermöglichen eine materialsparende Ausführung im Brückenbau. Unter wechselnder Beanspruchung können an den Gurtlamellenenden, aufgrund geometrischer und metallurgischer Kerbwirkung, Ermüdungsrisse entstehen. Um für diese kritischen Stellen eine möglichst hohe Ermüdungsfestigkeit zu erreichen, wird das Konstruktionsdetail in Deutschland mit vergleichsweise großer Nahtdicke und kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen hergestellt. Dafür wird die Lamelle bis zu einer bestimmten Höhe angefast und eine möglichst dicke Schweißnaht mit der gleichen Steigung wie die Fase bis zum Trägerblech geführt, sodass an der Lamellenstirn ein ebener Übergang zwischen Lamelle, Schweißnaht und Trägerblech entsteht. Diese Form der Ausführung und Bearbeitung wirkt sich vorteilhaft auf die Ermüdungsfestigkeit aus. Für die Bemessung kann dieser Vorteil jedoch nicht uneingeschränkt ausgenutzt werden, da ein entsprechendes Detail im Kerbfallkatalog von DIN EN 1993-1-9 [1] fehlt. Um eine experimentelle Grundlage zu schaffen, die eine Aufnahme in den europäischen Kerbfallkatalog rechtfertigt, wurden an der Universität Stuttgart mehrere Serien von Wöhlerversuchen durchgeführt.

Abstract

In bridge construction, cover plates are used for the reinforcement of girders in order to adapt the moment carrying capacity in highly stressed areas to the actual torque curve. The welded-on lamellae in some areas enable a material-saving design in bridge construction. Fatigue cracks can occur at the transverse end weld of the cover plate under alternating stress due to geometric and metallurgical notch effects. In order to achieve the highest possible fatigue strength for these critical points, the construction detail is manufactured in Germany with a comparatively large weld thickness and notch-free machined weld transitions. For this purpose, the lamella is chamfered to a certain height and a weld as thick as possible with the same pitch as the chamfer is guided to the base plate, so that an even transition between lamella, weld seam and base plate is created at the lamella face. This type of design and processing has a positive effect on fatigue strength. However, this advantage cannot be fully exploited for dimensioning purposes, as there is no corresponding detail in the DIN EN 1993-1-9 [1] detail catalogue. Several series of Wöhler tests were carried out at the University of Stuttgart in order to create an experimental basis which justifies inclusion in the European detail catalogue.

7.1 Stand der Forschung und Normung State of research and standardization

7.1.1 Stand der Forschung

State of research

7.1.1.1 Einführendes Beispiel

Damage case

Die Gurtlamelle zur lokalen Verstärkung von Trägerflanschen ist ein weit verbreitetes Konstruktionsdetail im Brückenbau. Einer der ersten dokumentierten Schäden an dem für die Materialermüdung kritischen Gurtlamellenende wurde 1970 an der Yellow Mill Pond Bridge in den USA entdeckt [111]. Der in Bild 7-1 dargestellte Ermüdungsriss wurde während Korrosionsschutzmaßnahmen gefunden und hatte sich bereits 400 mm in den Steg des Hauptträgers ausgebreitet. Insgesamt wurden weitere sieben Ermüdungsrisse an Gurtlamellenenden an der 1958 eröffneten Brücke gefunden.

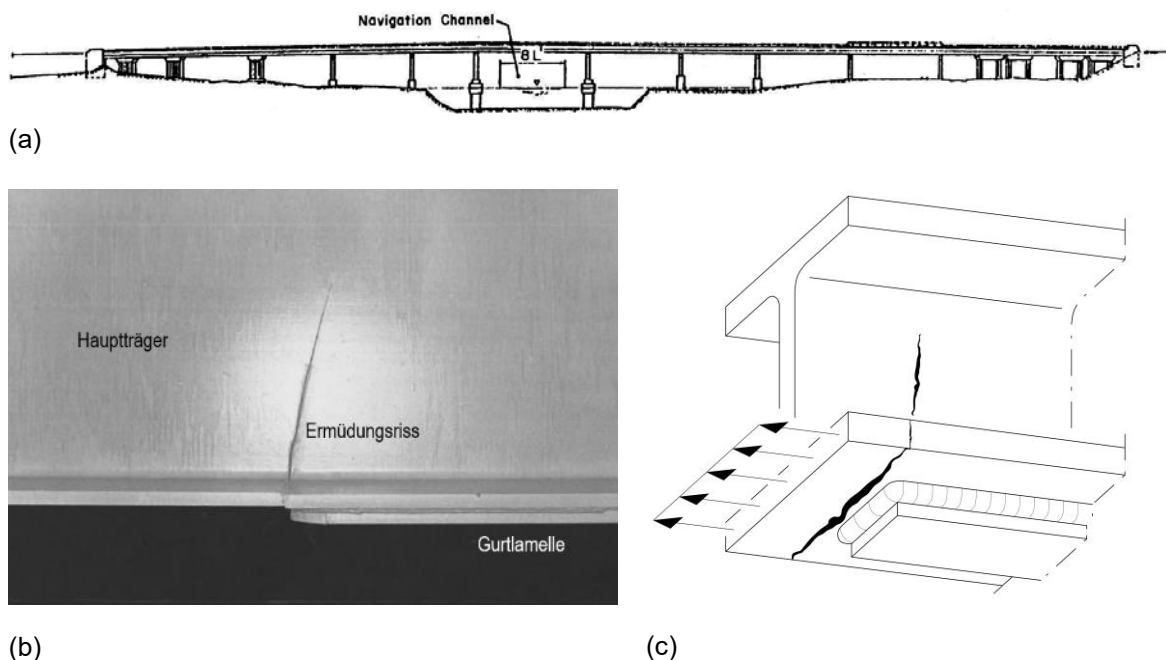


Bild 7-1: Yellow Mill Pond Bridge (a), Ermüdungsriss (b), schematische Darstellung (c) [111]

Figure 7-1: Yellow Mill Pond Bridge (a), fatigue crack (b), schematic sketch [111]

7.1.1.2 Experimentelle Untersuchungen von Graf

Experimental investigations by Graf

Die ältesten bekannten Untersuchungen wurden bereits 1937 von Otto Graf veröffentlicht [112].

In seiner Arbeit stellte er die Forschungsergebnisse seiner Untersuchungen zum Einfluss der Form und der Ausführung von aufgeschweißten Lamellen auf die Ermüdungsfestigkeit vor. Anstoß für die Forschungen war die fehlende wissenschaftliche Grundlage für die Vielzahl verschiedener Ausführungsarten, die im Rahmen der Verhandlungen für die Vorschriften für geschweißte, vollwandige Eisenbahnbrücken diskutiert wurden.

Um die praxistauglichste Konstruktion herauszufinden, wurden insgesamt 34 Kleinteil- und drei Trägerversuche mit verschiedenen Geometrien und Schweißnahtausführungen durchgeführt. Variiert wurden die Blechdicken, die Form der Lamellenenden, die Ausführung der Schweißnaht sowie die Schweißtechnik. Die Lamellenenden waren entweder zugespitzt, rechteckig oder rund geformt, vgl. Bild 7-2. Die drei Endformen wurden innerhalb von 17 Untergruppen mit verschiedenen Ausformungen und Bearbeitungsarten der Stirnnaht ausgeführt. Die Endnähte wurden entweder im Schweißzustand belassen, kerbfrei bearbeitet oder verstärkt. Pro Konfiguration wurden zwischen einem und vier Prüfkörper getestet.

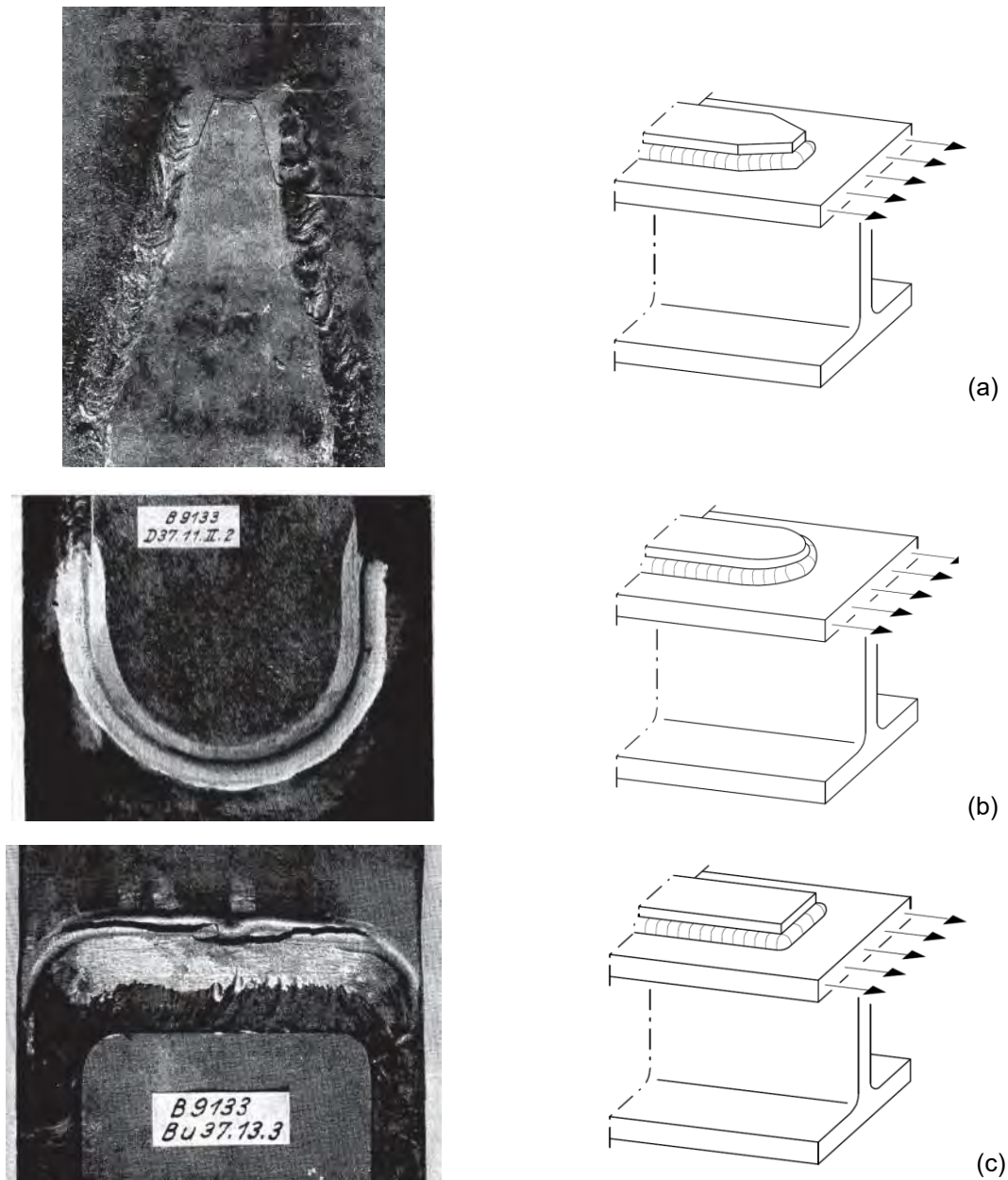


Bild 7-2: Untersuchte Endlamellenformen: zugespitzt (a), rund (b), rechteckig (c) [112]

Figure 7-2: Tested shapes of the cover plate end : sharpened (a), round (b), rectangular (c)

Durchgeführt wurden die Versuche an der Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart (damals Technische Hochschule Stuttgart). Auf die Prüfkörper wurde eine schwingende Belastung mit einer Frequenz von ca. 4,2 Hz bei den Kleinteilversuchen, beziehungsweise

3,5 Hz bei den Trägerversuchen, aufgebracht. Die Prüfkörper wurden aus üblichem Baustahl der Güte St 37 und St 52 gefertigt, was heute den Stahlsorten S 235 und S 355 entspricht.

Im Fazit der Studie wurde festgestellt, dass starke Kehlnähte am Lamellenende einen positiven Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit besitzen, die noch weiter verbessert werden kann, wenn die Kerbübergänge kerbfrei beschliffen werden. Die Untersuchungen dienen als experimentelle Grundlage für eine Regelung zur Ausführung des Details in geschweißten Eisenbahnbrücken [112].

7.1.1.3 Experimentelle Untersuchungen von Fisher

Experimental investigations by Fisher

Umfangreiche Untersuchungen zur Ausführung von Gurtlamellen wurden 1969 in den USA von J.W. Fisher [113] durchgeführt. Im Rahmen eines Forschungsprogramms an der Lehigh University in den USA wurden unterschiedliche Dicken der Lamellen und der Gurte untersucht. Ziel der damaligen Untersuchungen war es, einen Vorschlag zur Verbesserung der Bemessungskriterien für Stahlbrücken zu entwickeln.

Ausgehend von Schadensfällen an Stahlbrücken (vgl. Bild 7-1) sollten die Einflüsse aus der Unterkonstruktion (gewalzt oder geschweißt), der Lagenanzahl der Lamellen, den Lamellenabmessungen, der Stahlsorte und der Geometrie der Endlamelle untersucht werden.

Im Hinblick auf die Untersuchung verschiedener Lamellengeometrien wurden einerseits Lamellen, die schmaler als die Gurte waren, getestet und andererseits Lamellen, die breiter waren als die darunterliegenden Gurte (vgl. Bild 7-3). Beide Lamellenarten wurden an den Längsseiten mit einer Kehlnaht mit einer Dicke von $a = 6$ mm an den Gurten befestigt. An den Stirnseiten wurde die Lamelle jeweils an einer Seite mit einer Kehlnaht an dem Träger befestigt, wohingegen das andere Ende unverschweißt blieb.

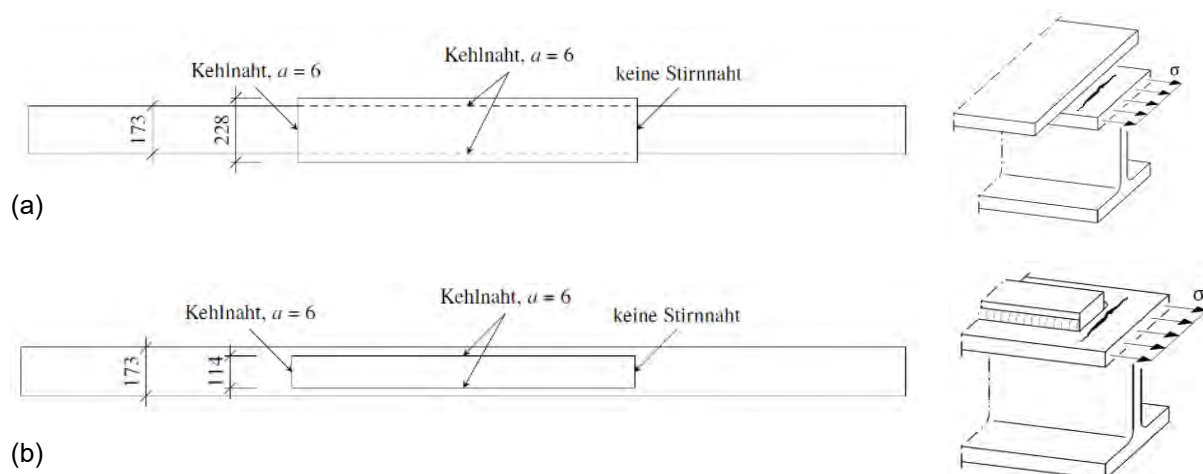


Bild 7-3: Trägerversuche Fisher [113] mit breiter (a) und schmaler Lamelle (b)

Figure 7-3: Girder specimens by Fisher [113] with wide (a) and narrow cover plate (b)

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden insgesamt 374 Stahlträger geprüft. Davon wurden 86 Träger zur Bestimmung der Nennfestigkeit ohne Lamelle hergestellt und weitere 204 Prüfkörper wurden zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von Trägern mit aufgeschweißten Gurtlamellen.

Aus den Ergebnissen schlussfolgerte Fisher, dass die Geometrie der Endlamelle keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit besitzt. Zudem sei es unerheblich, ob die Gurtlamellen mit oder ohne Stirnnaht ausgeführt werden. Mit Unterstützung von numerischen Untersuchungen zur Bruchmechanik wurde eine Blechdickenabhängigkeit festgestellt.

7.1.1.4 Experimentelle Untersuchungen von Bergqvist und Sperle

Experimental investigations by Bergqvist and Sperle

Bergqvist und Sperle [114] untersuchten auf Grundlage der Forschungsergebnisse von Fisher [113] gezielt eine Möglichkeit zur Herstellung eines weichen Schweißnahtübergangs zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von Gurtlamellenenden. Dafür wurde mithilfe einer Wolframelektrode gezielt der kritische Schweißnahtübergang nachträglich noch einmal aufgeschmolzen. Die Prüfkörper zeigten nach der Behandlung eine deutlich höhere Ermüdungsfestigkeit. Jedoch verschob sich in Folge der Nachbehandlung bei einigen Versuchskörpern die kritische Versagensstelle von dem Schweißnahtübergang zur Schweißnahtwurzel. Das ist ein im Brückenbau eher unerwünschter Effekt, da Ermüdungsrisse sich in diesem Fall eine gewisse Zeit ausbreiten können, bis sie an der Oberfläche sichtbar werden und so durch z.B. Inspektionsmaßnahmen entdeckt werden können. Die Untersuchungen zeigen auch, dass Kleinversuche und Trägerversuche unter einer Schwingbeanspruchung die gleichen Ermüdungsfestigkeiten aufweisen.

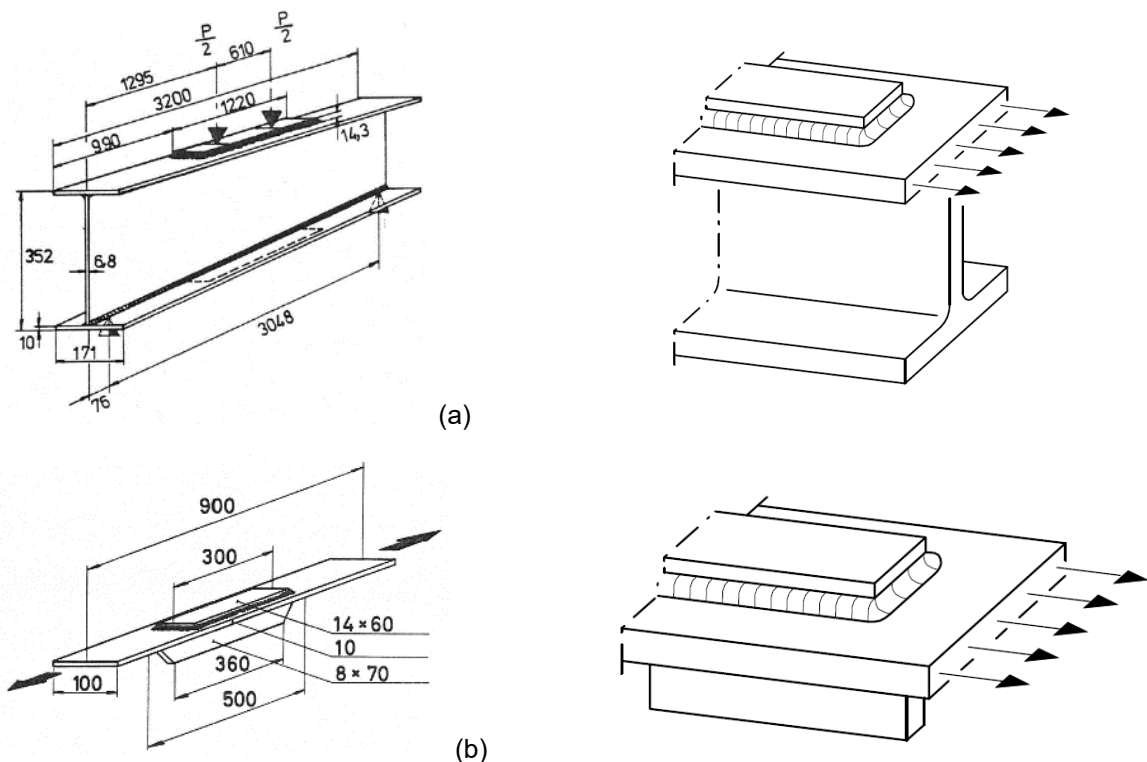


Bild 7-4: Versuche Bergqvist und Sperle [114] Trägerversuche (a) und Kleinversuche
 Figure 7-4: Specimens by Bergqvist and Sperle [114] girder- (a) and small scale specimens (b)

7.1.1.5 Experimentelle Untersuchungen von Berger

Experimental investigations by Berger

Weitere Untersuchungen zur Gurtlamelle wurden 1980 am Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR in Halle angestellt [115]. Untersucht wurden Träger mit Gurtlamellenenden, die sich an der klassisch deutschen Variante des Details orientieren. Zusätzlich

wurde die Ermüdungsfestigkeit von Details untersucht, deren Endlamellen nicht angefast und nachbearbeitet wurden. In Bild 7-5 sind beide Varianten dargestellt.

Die Last wurde auf den Drittelpunkten des Trägers mit einer Frequenz von ca. 3 Hz aufgebracht. Getestet wurden die Prüfkörper mit einer Zug-/Druckbelastung ($R = 1$) und einer Druckschwellbelastung ($R = 0,5$). Die Prüfkörper mit angefasten Lamelle ertrugen im Vergleich zu den Prüfkörpern ohne Fase bei gleicher Spannungsschwingbreite mehr Lastspiele und weisen damit einen höheren Ermüdungswiderstand auf.

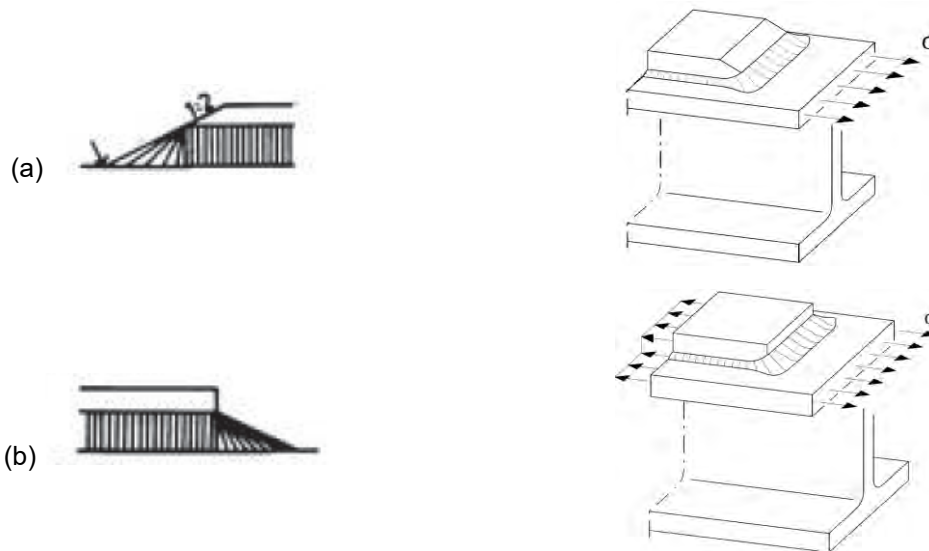


Bild 7-5: Trägerversuche Berger [115] traditionell deutsche Variante (a) und Variante ohne Anfasung und Nachbearbeitung (b)

Figure 7-5: Girder specimens by Berger [115] German version (a) and specimens without chamfering and grinding (b)

7.1.1.6 Sonstige bekannte experimentelle Untersuchungen

Other known experimental investigations

In zwei Forschungsprojekten der FOSTA [116] und [40] wurden Gurtlamellenenden unter anderem an hoch- und ultrahochfesten Feinkornbaustählen untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Ermüdungsfestigkeit durch die Anwendung höherfester Stähle nicht steigern lässt.

In [77] sind Ermüdungsversuche dokumentiert, bei denen in Kleinversuchen die Lamelle nur einseitig auf ein Blech aufgeschweißt wurde. Aufgrund der Exzentrizität und der daraus resultierenden Biegewirkung wurde auf eine Auswertung der Daten verzichtet.

7.1.1.7 Übersicht zu bekannten experimentellen Untersuchungen

Statistical analysis of known experimental investigations

Die Details mit einfacher umlaufender Kehlnaht ohne Anfasung liefern vergleichbare Ermüdungsfestigkeiten wie Varianten ohne Stirrnaht, siehe auch [113]. Gurtlamellenenden, bei denen die Stirrnaht verstärkt oder nachbearbeitet wurde, zeigen deutlich verbesserte Ermüdungsfestigkeiten. Eine zusammenfassende Übersicht der bekannten experimentellen Daten zum Konstruktionsdetail Gurtlamellenende ist in Bild 7-6 gegeben. Zusammenfasst werden einfache Varianten, die ohne oder mit gleichmäßig umlaufender Kehlnaht ausgeführt wurden. Dazu gehören insbesondere die Versuche von Fisher [113]. Ebenfalls

zusammengefasst werden Varianten, die verstärkt oder nachbearbeitet wurden. Dazu gehören die Untersuchungen von Berqvist und Sperle [114], sowie von Graf [112]. Untersuchungen an der traditionell deutschen Variante mit einem Anstiegswinkel von 1:2 und kerbfreier Nachbearbeitung sind in den Untersuchungen von Berger [115] enthalten.

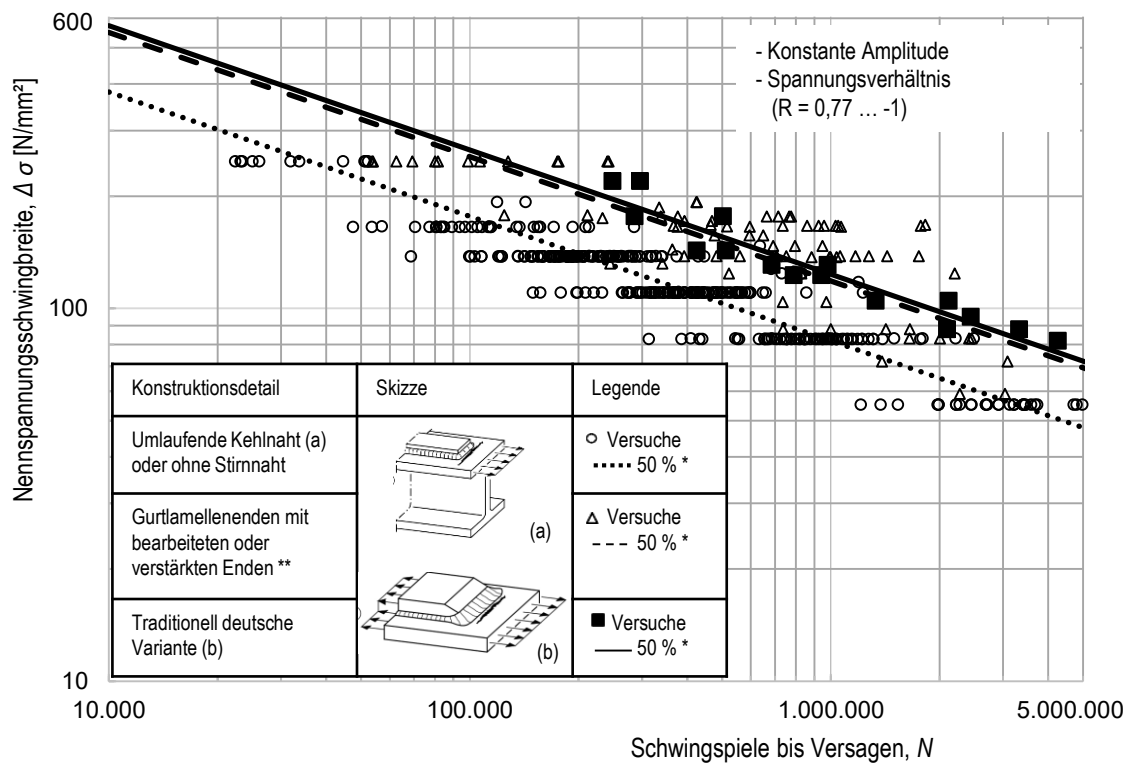


Bild 7-6: Übersicht der bekannten experimentellen Untersuchungen an Gurtlamellenenden. * Regressionsgerade mit 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit (m= 3). ** Gurtlamellenenden mit bearbeiteten oder verstärkten Enden, die jedoch nicht oder nicht vollständig der traditionell deutschen Variante entsprechen.

Figure 7-6: Overview of known experimental results. *Regression line with 50% survival probability (m = 3). **Transverse end welds with blended or reinforced ends that do not or not completely correspond with the traditional German version.

7.1.2 Stand der Normung

State of standardization

Für Gurtlamellen gibt es verschiedene Ausführungsvarianten, die unterschiedlichen Kerbfällen zugeordnet werden. Gurtlamellen mit und ohne Stirrnaht, die einlagig oder mehrlagig auf einen Träger geschweißt werden können, werden nach DIN EN 1993-1-9 [1] einem Kerbfall zwischen 56* und 36 zugeordnet, siehe Bild 7-7. Der Kerbfall richtet sich dabei nach der Dicke der Lamelle, wobei der höchste Kerbfall nur für Gurtlamellen gilt, bei denen die Lamelle dünner ist als das Gurtblech und das Gurtblech gleich oder dünner als 20 mm ist. Bei dickeren Blechdicken verringert sich der Kerbfall des Konstruktionsdetails auf bis zu 36. Es wird also ein Blechdickeneinfluss berücksichtigt. Bei dieser Variante wird die Lamelle mit einer einfachen Kehlnaht am Träger befestigt. Die Lamellenlänge muss mindestens 300 mm betragen. Bei einer weiteren Variante nach DIN EN 1993-1-9 [1] wird die Stirrnaht der Gurtlamelle verstärkt ausgeführt, siehe Bild 7-7 (b). Dieses Detail wird dem Kerbfall 56 zugeordnet. Eine Unterteilung, abhängig der Blechdicke wie im vorigen Detail, findet nicht statt. Des Weiteren muss die Stirrnaht blecheben geschliffen werden und bei Lamellendicken größer als 20 mm muss die Neigung der Stirrnaht geringer als 1/4 sein. Zur Dicke der Stirrnaht werden keine Angaben gemacht.

	$t_c < t$	$t_c \geq t$	<p>6) Endbereiche von einlagig oder mehrlagig aufgeschweißten Gurtplatten mit und ohne Stirrnaht.</p>	<p>6) Wenn die Lamellen breiter sind als der Flansch, ist eine Stirrnaht, die sorgfältig ausgeschliffen wird, um Einbrandkerben zu entfernen, erforderlich. Die minimale Lamellenlänge beträgt 300 mm. Für kürzere Lamellen siehe Abstufung für Kerbfall 1.</p>	
56*	$r \leq 20$	—		<p>7) Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern. 5 r_c ist die Minillänge der Verstärkungsnaht.</p>	<p>7) Die Stirrnaht ist blechen zu schleifen. Zusätzlich ist für $r_c > 20$ mm die Lamelle mit einer Neigung $< 1/4$ auszubilden.</p>
50	$20 < r \leq 30$	$r \leq 20$			
45	$30 < r \leq 50$	$20 < r \leq 30$			
40	$r > 50$	$30 < r \leq 50$			
36	—	$r > 50$			

(a)

56	<p>verstärkte Stirrnaht</p>	<p>7) Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern. 5 r_c ist die Minillänge der Verstärkungsnaht.</p>	<p>7) Die Stirrnaht ist blechen zu schleifen. Zusätzlich ist für $r_c > 20$ mm die Lamelle mit einer Neigung $< 1/4$ auszubilden.</p>
----	-----------------------------	--	---

(b)

Bild 7-7: Kerbfalleinstufungen Gurtlamellenende nach DIN EN 1993-1-9 [1]: einfache Umschweißung o-der ohne Stirrnaht (a), verstärkte Strirrnaht (b)

Figure 7-7: Fatigue detail category for cover plate ends according to Eurocode 3 Part 1-9 [1]: fillet weld with or without transverse end weld(a), reinforced transverse end weld (b)

Im nationalen Anhang von Eurocode 3 Teil 2 [94] ist der Kerbfall für Gurtlamellenenden auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern mit 71 N/mm² angegeben. Als Anforderung für diesen Kerbfall müssen die Übergänge kerbfrei bearbeitet und die Ecken der Stirrnaht abgerundet sein. Die Steigung der Fassung und Stirrnaht ist mit 1:2 vorgegeben. Das Detail entspricht der „traditionell deutschen Variante“ des Gurtlamellenendes. Die Variante ist in sehr ähnlicher Form in den Richtlinien für Eisenbahnbrücken der Deutschen Bahn ab 1955 zu finden [117], [118].

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderung
71		<p>Gurtlamellenende auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern</p> <p>Übergänge kerbfrei bearbeitet, Ecken der Stirrnaht abgerundet</p>	

(a)

Das Zeichen \downarrow bedeutet, daß die Übergänge in Krachrichtung kerbfrei zu bearbeiten sind.

--	--

(b) (c)

Bild 7-8: Traditionell deutsche Variante des Konstruktionsdetails Gurtlamellenende: Deutscher Nationaler Anhang EC 3 Teil 2, 2010 [94] (a), DS 804, 1980 [117] (b), Vorschriften für geschweißte Eisenbahnbrücken, 1955 [118] (c)

Figure 7-8: Transverse end welds of cover plates - German version: German National Annex EC 3 Part 2, 2010 [94] (a), DS 804, 1980 [117] (b), Vorschriften für geschweißte Eisenbahnbrücken, 1955 [118] (c)

Weitere Varianten des Konstruktionsdetails sind im Kerbfallkatalog des IIW [16] und in der Kranbaunorm DIN EN 13001-1-3 [18] gegeben. Letztere beinhaltet unterschiedliche Ausführungsvarianten, vgl. Bild 7-9, mit Einstufungen zwischen Kerbfall 56 und 112.

Detail Nr	$\Delta\sigma_c$ $\Delta\tau_c$ N/mm ²	Konstruktionsdetail	Anforderungen	
3.18	$m = 3$	<p>Durchlaufelement mit lasttragender Gurtplatte, Spannung im Durchlaufelement am Ende der Verbindung</p>	Grundbedingungen: — kontinuierliche Kehl- oder Fugennaht	
		112		Gurtplatte mit Endfasung $\leq 1:3$; Kantenschweißnaht und Ende der Fugennaht in Schweißqualität Bewertungsgruppe B*
		100		Gurtplatte mit Endfasung $\leq 1:2$; Kantenschweißnaht und Ende der Fugennaht in Schweißqualität Bewertungsgruppe B*
3.19	$m = 3$	<p>Durchlaufelement mit lasttragender Gurtplatte, Spannung im Durchlaufelement am Ende der Verbindung</p>	Grundbedingungen: — kontinuierliche Kehl- oder Fugennaht — $r_0 \leq 1,5 t_0$	
		80		Kantenschweißnaht und Ende der Fugennaht in Schweißqualität Bewertungsgruppe B*
3.20	$m = 3$	<p>Durchlaufelement mit lasttragender Gurtplatte, Spannung im Durchlaufelement am Ende der Verbindung</p>	Grundbedingungen: — kontinuierliche Kehl- oder Fugennaht	
		63		Bewertungsgruppe B
		56		Bewertungsgruppe C

Bild 7-9: Kerballeinstufungen nach DIN EN 13001-1-3 [18]: Traditionell deutsche Variante (a) verstärkte Endnaht (b), einfache Umschweißung (c)

Figure 7-9: Fatigue detail category according to DIN EN 13001-1-3 [18]: German version (a), reinforced transverse end weld (b), fillet weld without reinforcement (c)

7.2 Versuchskörper und Versuchsprogramm

Specimens and test program

7.2.1 Übersicht

Overview

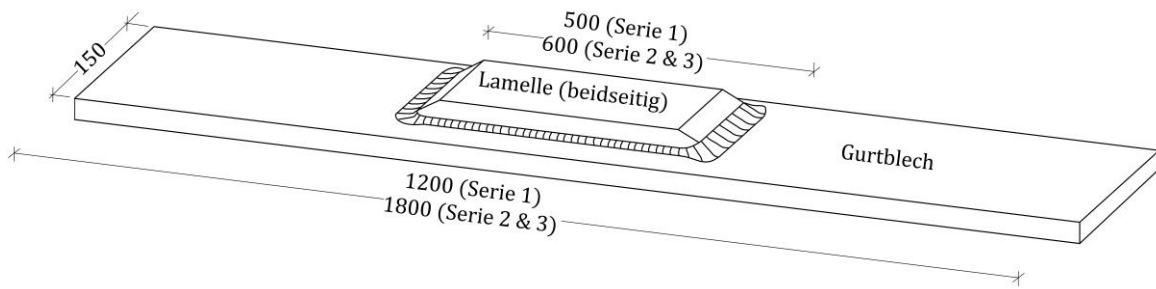
Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden Ermüdungsversuche an der traditionell deutschen Variante des Konstruktionsdetails Gurtlamellenende durchgeführt. Ziel der Versuche und des Forschungsvorhaben ist es, das bereits im deutschen Nationalen Anhang von Eurocode 3 Teil 2 [94] beschriebene Konstruktionsdetail in den Hauptteil des Eurocode für Ermüdung DIN EN 1993-1-9 [1] zu überführen. Um eine ausreichende Datenbasis für die Bestimmung des charakteristischen Kerbfalls zu erhalten, wurden an der Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart (MPA) insgesamt 36 Ermüdungsversuche durchgeführt. Mithilfe der Versuche wird eine konkrete Kerbfalleinordnung vorgenommen. In diesem Kapitel werden die Versuchskörper, sowie das Versuchsprogramm, beschrieben.

7.2.2 Versuchsserien und Geometrie

Test series and geometry

Die 36 Prüfkörper wurden in drei Serien mit jeweils zwölf Prüfkörpern aufgeteilt. Die Prüfkörper der Serie 1 erhielten die Bezeichnungen PK1.1 bis PK1.12, die Prüfkörper der Serie 2 erhielten die Bezeichnungen PK2.1 bis PK2.12 und die Prüfkörper von Serie 3 erhielten die Bezeichnungen PK3.1 bis PK3.12. Jede Serie zeichnet sich durch eine andere Prüfkörpergeometrie aus. Die Konstruktionsgeometrien der einzelnen Serien sind in Bild 7-10 dargestellt. Die Prüfkörper der Serie 1 wurden aus einem Trägerblech, das 1200 mm lang, 150 mm breit und 20 mm dick war, gefertigt. Mittig wurde auf beiden Seiten des Trägers je eine 460 mm lange, 90 mm breite und 20 mm dicke Lamelle aufgeschweißt. Die Lamelle wurde an den Stirnseiten mit einer Steigung von 1:2 bis zur halben Lamellenhöhe (10 mm) gefast. Die Schweißung der Lamellen an das Gurtblech erfolgte an den Längsseiten mit einer Kehlnaht mit einem a -Maß von 4 mm. An den Stirnseiten wurde die Lamelle mit einer verstärkten Kehlnaht am Träger befestigt. Die Kehlnaht wurde, ebenfalls wie die Fase, mit einer Steigung von 1:2 ausgeführt. Zwischen Stirnnaht und Längsnaht wurden die Ecken der Schweißnaht mit einem Radius von 10 mm ausgerundet. Bei den Prüfkörpern von Serie 2 hatten die Lamellen und das Trägerblech jeweils eine Dicke von 50 mm. Das Gurtblech war 1800 mm lang und 150 mm breit, während die Lamellen 500 mm lang und 90 mm breit waren. Die Längsnaht wurde bei Serie 2 mit einem a -Maß von 5 mm ausgeführt. Die Stirnnaht und die Lamellenfase hatten wie bei Serie 1 eine Steigung von 1:2, wobei die Ecken wieder mit einem Radius von 10 mm ausgerundet waren. Die Ecknaht wurde an der Außenseite der Lamelle ab Lamellenende in einer Länge von 50 mm bis zur Längsnaht hin verjüngt. Die Außenabmessungen von Serie 3 entsprachen denen von Serie 2. Jedoch wurde die Stirnnaht im Gegensatz zu den anderen beiden Serien nicht mit einer Steigung von 1:2, sondern mit einer Steigung von 1:3 ausgeführt. Die Höhe der Stirnnaht betrug ein Drittel der Lamellenhöhe (17 mm). Entsprechend wurde die Lamelle 33 mm ab Oberkante Lamelle gefast.

Die Fertigungspläne und Schweißanweisungen sind in [119] dokumentiert.

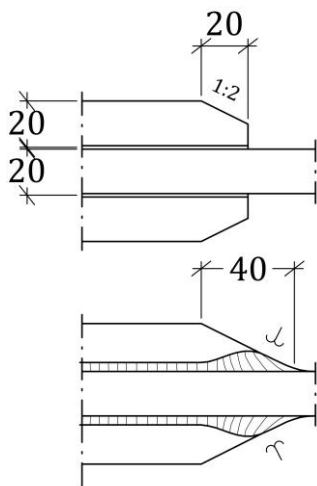


(a)

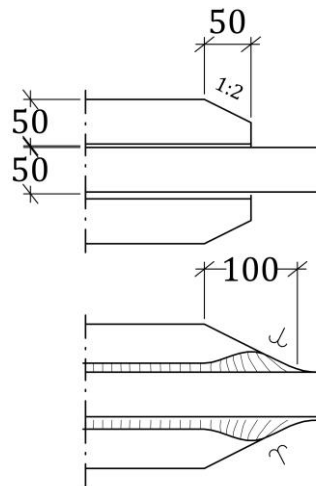
Serie 1 (12 Versuchskörper)

Serie 2 (12 Versuchskörper)

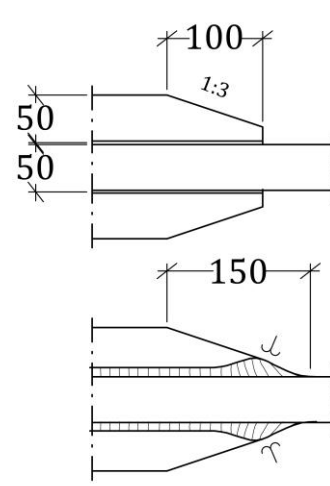
Serie 3 (12 Versuchskörper)



Stahlbaubetrieb A & B



Stahlbaubetrieb A & B



Stahlbaubetrieb C

Bild 7-10: Prüfkörpergeometrien

Figure 7-10: Geometry of the specimens

Alle Versuchskörper wurden symmetrisch gestaltet, um planmäßige Biegeeinflüsse zu unterbinden. Serie 1 und 2 entsprechen den geometrischen Definitionen des traditionell deutschen Details mit unterschiedlichen Blechdicken, siehe Bild 7-10. Lediglich der seitliche Übergang von Stirnnaht zu Flankennaht wurde verkürzt.

Als Material wurde S 355 J2+N verwendet, die mechanischen Eigenschaften der Prüfkörper sind in Tabelle 7-1 dargestellt.

Tabelle 7-1: Mechanische Eigenschaften Prüfkörper

Table 7-1: Mechanical Properties

Prüfkörper Nr. [-]	Streckgrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Kerbschlagarbeit bei -20C° [J]
1.1 – 1.6 1.7 – 1.12*	407 369-392	562 523-541	90 107-201
2.1 – 2.6 2.7 – 2.12	387 433	541 547	180 268
3.1 – 3.12	369	513	213
(Mittelwerte aus mindestens 3 Versuchen) * mehrere Chargen			

7.2.3 Herstellung der Prüfkörper

Manufacturing of the specimens

7.2.3.1 Schweißvorbereitungen

Weld preparation

Um Auswirkungen aus unterschiedlichen Herstellungseinflüssen praxisnah abbilden zu können, wurden die Versuchskörper von drei verschiedenen Stahlbaubetrieben mit Erfahrungen im Stahlbrückenbau gefertigt. Die Gurtbleche sowie die Lamellen wurden zuerst automatisch mit einem Brennschneider aus großen Blechen zugeschnitten. Im Anschluss wurden die Lamellen zur Fixierung der Position mit Heftnähten auf den Gurten befestigt, Bild 7-1. Alle Prüfkörper wurden auch im Bereich der späteren Wurzellage mit Heftnähten fixiert. Vor dem eigentlichen Schweißprozess wurden die Bleche vorgewärmt, vgl. Bild 7-1 (u.l.).



Bild 7-11: Schweißvorbereitungen: angeheftete Gurtlamellen (o.l) und (o.r.), Skizzieren der Schweißnahtgeometrie (u.l) und vorwärmen (u.r.)

Figure 7-11: Weld preparation: tack welds of cover palte (t.l.) and (t.r.), prefigure of weld geometry (b.l.), preheating (b.r.)

7.2.3.2 Schweißen der Prüfkörper

Welding of the specimens

Zur Herstellung der Längs- und Stirnnähte wurde das Metall-Aktivgasschweißverfahren angewendet. Es wurden sowohl Massivdrahtelektroden als auch metallpulvergefüllte Drahtelektroden verwendet. Die Stirnnähte wurden aufwändig in mehreren Lagen hergestellt. In Bild 7-12 ist der Fortschritt der Lagenschweißung dokumentiert. Während des Herstellungsprozesses wurde die Zwischenlagentemperatur unter 260°C gehalten, um unerwünschte Effekte aus zu hoher Wärmeeinwirkung zu verhindern. Die Temperatur

wurde in regelmäßigen Abständen gemessen, vgl. Bild 7-12 (o.l.). Um die Biegung und den Verzug infolge der Lagerung und der Bearbeitung möglichst gering zu halten, wurden die Prüfkörper mehrfach gewendet und die beiden Lamellen abwechselnd bearbeitet.

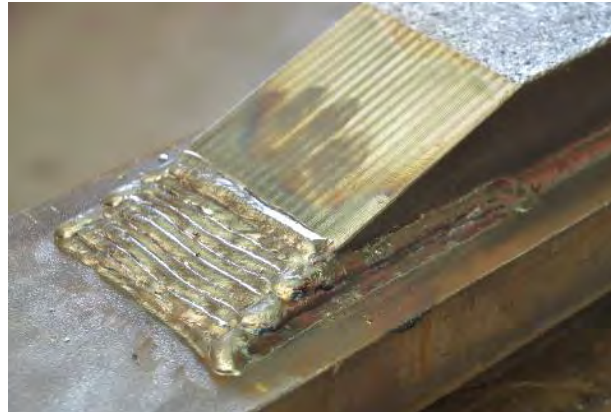


Bild 7-12:Schweißen der Prüfkörper: Messen von Zwischenlagentemperaturen (o.l.), Schweißen der Flankennaht (o.r.) und (m.r.), Stirnnaht wie geschweißt und ungereinigt (m.r.), Entfernen von Schlackeresten mit Nadelpistole (u.l.), Stirnnaht im Schweißzustand belassen (u.r.)

Figure 7-12: Welding of the specimens: Measuring of temperature in the weld (t.l.), welding of the specimen (t.r.) and (m.l.), as welded condition with slag on the surface (m.r.), removing slag with needle gun (b.l.), as welded condition (b.r.)

Für Serie 2 mit 50 mm dicken Blechen waren 50 Schweißraupen notwendig. Serie 3 mit 50 mm dicken Blechen und angepasster Endgeometrie benötigte etwa 30 Raupen.

7.2.3.3 Schweißnahtnachbearbeitung

Post treatment of the weld

Nach Beendigung der Schweißarbeiten wurden die Stirnnahte blecheben geschliffen, die Übergänge kerbfrei bearbeitet sowie die Ecken der Stirnnaht abgerundet. Dazu wurden herstellerabhängig Fächerschleifer oder Rollschleifer verwendet, siehe Bild 7-13. Zwischen den einzelnen Prüfkörpern gab es hinsichtlich der Qualität der Nachbearbeitung deutliche Unterschiede. Einige Versuchskörper der Serie 2 zeigten nach der Bearbeitung noch deutliche Restkerben. In den Ermüdungsversuchen lieferten die einwandfrei bearbeiteten Nahtübergänge später bessere Ermüdungsfestigkeiten. Die gute Qualität der Nahtübergänge liegt hauptsächlich in der Handfertigkeit des Schweißers. Ein Beispiel für einen einwandfrei bearbeiteten Nahtübergang ist in Bild 7-13 (u.r.) dargestellt.

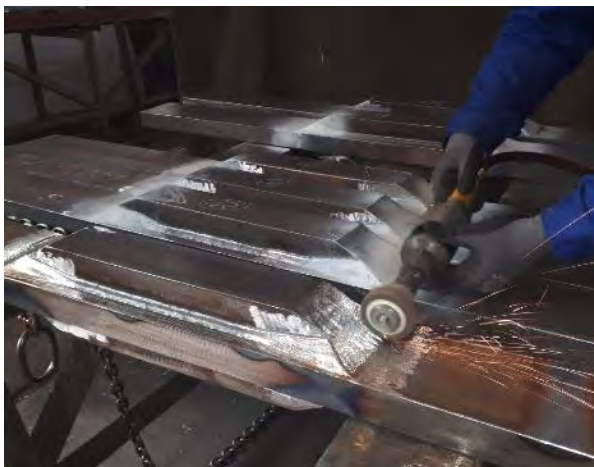
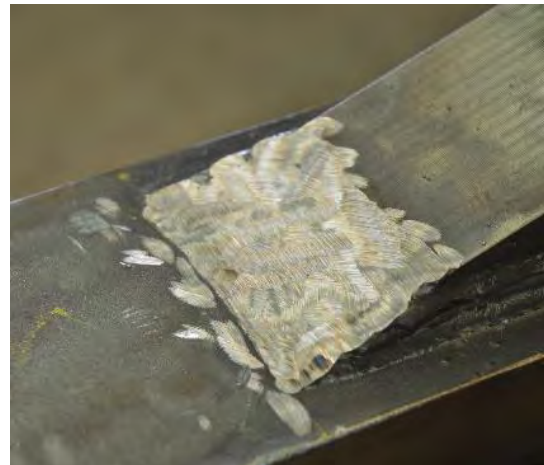


Bild 7-13: Bearbeitung der Oberfläche mit Winkelschleifer (o.l.), Oberfläche nach grober Bearbeitung (o.r.), Nachbearbeitung mit Rollenschleifer (u.l.), kerbfrei bearbeitetes Gurtlamellenende (u.r.)

Figure 7-13: Grinding the surface with angle grinder (t.l.), Surface after first grinding (t.r.), post treatment with roll grinder (b.l.), transverse end weld of cover plate with machined weld toe and surface

7.3 Versuchsdurchführung und Messtechnik

Testing and measurement

7.3.1.1 Prüfmaschinen

Test rigs

Zur Durchführung der Versuche standen drei Prüfmaschinen mit unterschiedlichen Oberlasten zur Verfügung. Die Prüfmaschine der Fa. Schenk hat eine maximale statische Oberlast von 1 MN und eine dynamische Oberlast von 0,8 MN. Des Weiteren wurde eine Prüfmaschine der Fa. Losenhausen mit einer statischen Oberlast von rund 2 MN und einer dynamischen Oberlast von rund 1,1 MN eingesetzt, sowie eine Prüfmaschine der Fa. Amsler mit einer statischen Oberlast von 5 MN und einer dynamischen Oberlast von 2,5 MN. Die Abmessungen der Prüfkörper von Serie 2 und 3 wurden unter Berücksichtigung der Maximallast der Amsler Prüfmaschine festgelegt. Die Prüfkörper wurden senkrecht stehend in die Maschine gespannt. Bei der Schenk Prüfmaschine wurden die Prüfkörper automatisch von runden Klemmbacken hydraulisch eingeklemmt. Bei den Maschinen Losenhausen und Amsler hingegen mussten die Prüfkörper mechanisch von Hand eingespannt werden, da die Prüfmaschinen über mechanische Keilspannbacken verfügen. Eine Übersicht der Prüfmaschinen ist in Bild 7-14 gegeben.



Bild 7-14: Prüfmaschinen: Fa. Schenk (links), Fa. Losenhausen (Mitte), Fa. Amsler (rechts)

Figure 7-14: Test rigs: Fa. Schenk (left), Fa. Losenhausen (middle), Fa. Amsler (right)

Eine Übersicht der Prüfmaschinenbelegung der Prüfkörper ist in Tabelle 7-2 gegeben.

Tabelle 7-2: Übersicht Prüfmaschinenbelegung

Table 7-2: Overview test machine occupancy

Serie	Schenk	Losenhausen	Amsler
Serie 1	1.1, 1.2, 1.4 - 1.9	1.3, 1.10 - 1.12	/
Serie 2	/	2.6, 2.10	2.1 - 2.5, 2.7 - 2.11
Serie 3	/	3.8, 3.9	3.1 - 3.7, 3.10 - 3.12

7.3.1.2 Messtechnik

Measurement

Zur Bestimmung der Nennspannungen und von eventueller Biegung in den Prüfkörpern wurden Dehnmessstreifen (DMS) auf die Prüfkörper geklebt. Bei einer Verformung im Bauteil verlängern oder verkürzen sich die einzelnen Drähte des Messgitters ebenfalls. Dadurch ändert sich der elektrische Widerstand der DMS. Diese Änderung wird vom angeschlossenen Messrechner erfasst und in Dehnungen umgerechnet. Auf die Prüfkörper wurden Linear-DMS mit einer Messgitterlänge von 3 mm und einer Messgitterbreite von 1,7 mm geklebt.

Insgesamt wurden an jedem Prüfkörper sechs Dehnmessstreifen angebracht, siehe Bild 7-15, wovon immer zwei gegenüberliegend auf den Seiten 3 und 4 aufgeklebt wurden. Die DMS waren somit auf zwei Seiten und in drei Ebenen verteilt. Zwei DMS waren mittig auf den Lamellen angeordnet. Die übrigen vier DMS wurden im Abstand von 50 mm von der jeweiligen Kerbe platziert, damit die Kerbspannungen die Messung der Nennspannung nicht beeinflussen. Jeweils bei den ersten Prüfkörpern jeder Serie wurden vier zusätzliche Dehnmessstreifen auf den schmalen Seiten angebracht.

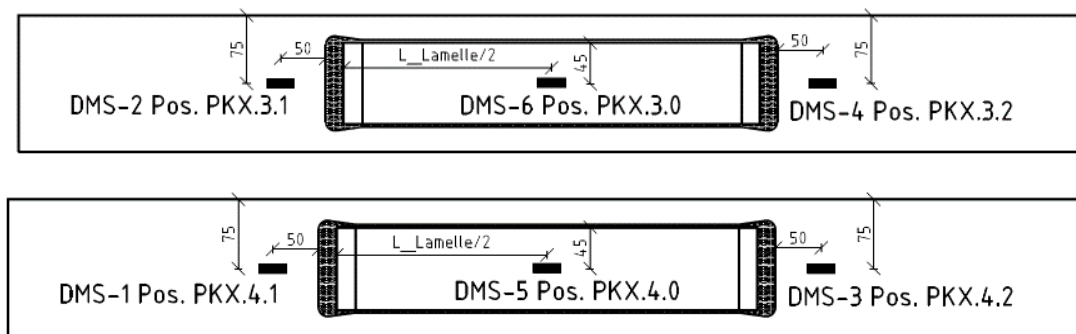


Bild 7-15: Anordnung der DMS auf Vorder- und Rückseite

Figure 7-15: Strain gauges on front and back side of the specimen

Neben den direkt auf den Prüfkörper applizierten DMS wurden während der Versuche die Kraft und der Weg des Prüfzylinders aufgezeichnet.

7.3.1.3 Messung von Strukturspannungen

Measurement of geometric (hot spot) stresses

Für die spätere Verifizierung der numerischen Berechnungen wurden bei je einem Prüfkörper pro Serie Dehnmessstreifen zur Messung der Strukturspannungen platziert. Die Platzierung und Anzahl der Dehnmessstreifen orientierte sich an den Empfehlungen des International Institute of Welding [16], wonach diese von der Bauteildicke, der Strukturspannungsart und der vorhandenen Biegespannung abhängen. Vorgeschlagen wird bei einer Kehlnaht eine Anordnung im Abstand von $0,4 \cdot t$, $0,9 \cdot t$ und $1,4 \cdot t$ vom Nahtfuß, siehe Bild 7-16 und Abschnitt 2.3.4.

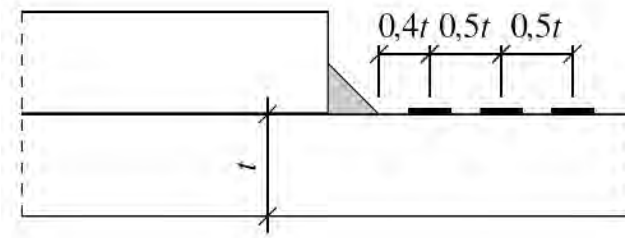


Bild 7-16: Anordnung der DMS zur Messung von Strukturspannungen nach [16]

Figure 7-16: Arrangement of strain gauges for measuring geometric (hot spot) stresses acc. to [16]

Bei Prüfkörper 1.11 der Serie 1, der eine Plattendicke von 20 mm hat, wurden neben den üblichen sechs Dehnmessstreifen acht Weitere zur Messung der Strukturspannungen angebracht. Jeweils vier der zusätzlichen DMS wurden in einer Reihe in der Mitte des Prüfkörpers auf beiden Seiten des Prüfkörpers gegenüberliegend angebracht. Die DMS wurden entsprechend im Abstand von 0,8 mm, 13 mm und 18 mm von der Kerbe platziert. Zusätzlich wurde auf jeder Seite ein DMS im Abstand von 28 mm von der Kerbe angebracht.

Bei Prüfkörper 2.10 der Serie 2 wurden pro Seite acht weitere DMS platziert, vgl. Bild 7-17. Die DMS wurden in einer Reihe zwischen der Kerbe und einem Abstand von 50 mm hintereinander angebracht. Der erste DMS wurde im Abstand von etwa 5 mm von der Kerbe entfernt angebracht.

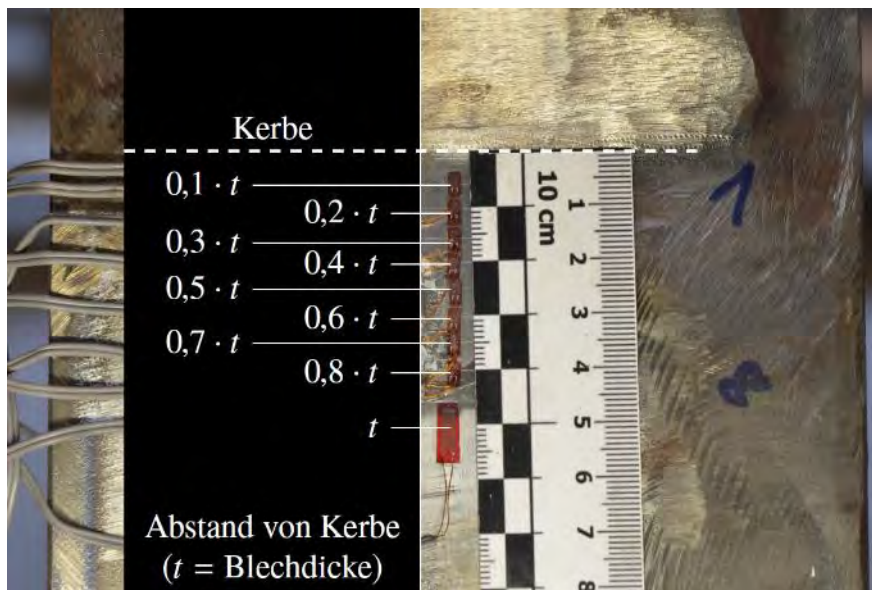


Bild 7-17: Messung der Strukturspannungen bei PK 2.10

Figure 7-17: Measurement of geometric (hot spot) stresses on PK 2-10

Auf dem Prüfkörper 3.7 der Serie 3 wurden, wie bei dem Prüfkörper 1.11, auf jeder Seite vier DMS zur Messung der Strukturspannungen angebracht. Da die Blechdicke hier 50 mm betrug, wurden die DMS entsprechend des IIW im Abstand von 20 mm, 45 mm und 65 mm angebracht. Auf jeder Seite wurde zusätzlich ein weiterer DMS im Abstand von 10 mm von der Kerbe entfernt platziert.

7.3.1.4 Versuchsdurchführung

Testing procedure

Vor dem Versuchsbeginn und vor dem Schließen der Klemmbacken zur Einspannung des Prüfkörpers, wurden die Dehnmessstreifen kalibriert. Somit wurde gegebenenfalls die bereits vorhandene Biegung im Prüfkörper aufgezeichnet bevor die eigentliche Last aufgebracht wurde.

Die Prüfkörper wurden zuerst statisch vorbelastet und anschließend dynamisch beansprucht.

Für den statischen Versuch wurden die Prüfkörper in Schritt 1 mit einem Drittel der für den Versuch vorgesehenen Oberlast belastet. Anschließend wurde dieses Lastniveau fünf Minuten gehalten, bevor der Körper wieder entlastet wurde (Schritt 2). Diese beiden Schritte wurden mit zwei Dritteln der Oberlast und der gesamten Oberlast wiederholt, bevor die Mittellast für den Start des darauffolgenden Schwingversuchs angefahren wurde.

Vor Beginn des Schwingversuchs wurde der Prüfkörper bis zur Mittellast belastet. Von diesem Lastniveau ausgehend startete der Schwingversuch mit einer Frequenz zwischen 0,5 Hz und 7 Hz. Die Frequenz war abhängig von der jeweiligen Prüfmaschine und der Oberlast. Die Prüfkörper wurden bis zum vollständigen Bruch geprüft. Bei Serie 1 waren bei PK 1.7 nach fünf Millionen Schwingspielen keine Risse zu erkennen, sodass der Versuch aus wirtschaftlichen und zeitlichen Gründen gestoppt wurde. Der Prüfkörper wurde anschließend auf einem höheren Lastniveau bis zum Versagen weitergeprüft. Bei Serie 2 erreichte PK 2.10 drei Millionen Schwingspiele ohne Anzeichen eines baldigen Versagens, sodass die Prüflast bei diesem Prüfkörper ebenfalls erhöht wurde. Das Abbruchkriterium war das komplette Versagen eines Prüfkörpers, vgl. Bild 7-18.

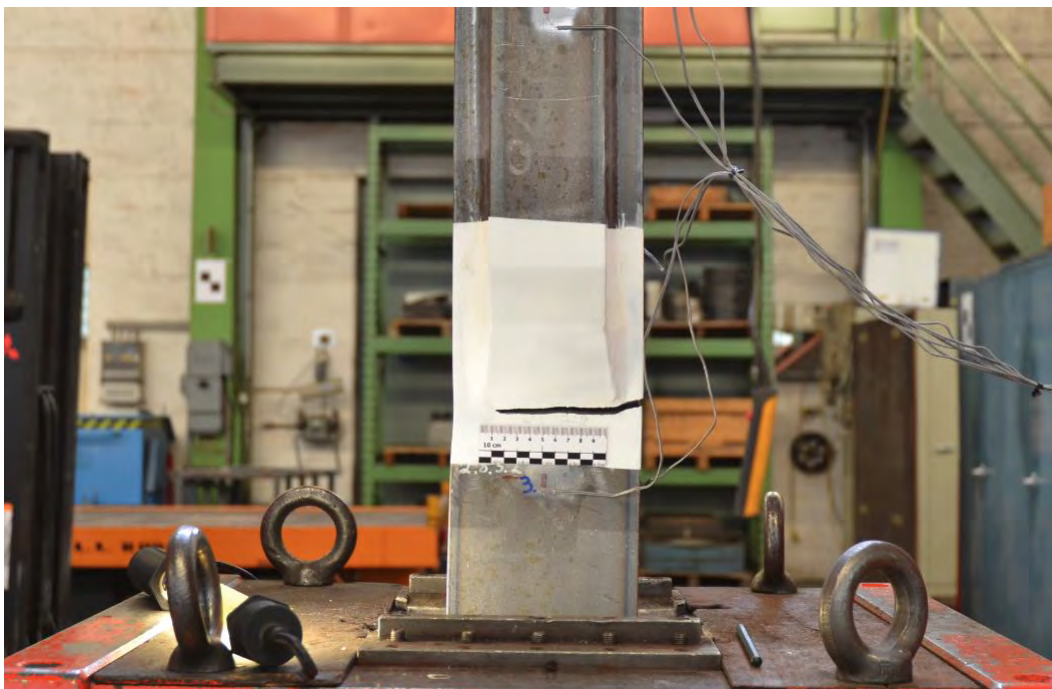


Bild 7-18: Prüfkörper kurz vor Erreichen des Versagenskriteriums (Prüfkörperbruch) PK 2.8

Figure 7-18: Test specimen shortly before total rupture (PK 2.8)

7.4 Versuchsergebnisse

Test results

7.4.1 Übersicht

Overview

Eine Übersicht der Versuchsergebnisse ist in Tabelle 7-3 gegeben. Für die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeiten auf Nennspannungsniveau wurde die Spannung im Nennquerschnitt des Gurtes ermittelt und mithilfe von Dehnungsmessungen überprüft.

Tabelle 7-3: Übersicht Versuchsergebnisse

Table 7-3: Overview test results

Prüfkörper Nr. [-]	Nennspannung $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Schwingspiele bis Bruch [-]	Maßgebende Kerbe [-]
1.1	240	266.969	Nahtübergang
1.2	230	542.995	Nahtübergang
1.3	320	134.785	Nahtübergang
1.4	198	780.372	Nahtübergang
1.5	170	772.145	Nahtübergang
1.6	150	1.938.606	Nahtübergang
1.7*	129	(5.000.001)	ohne Versagen
1.7H	267	243.626	Nahtübergang
1.8	185	559.059	Nahtübergang
1.9	150	2.123.825	Nahtübergang
1.10	360	63.531	Nahtübergang
1.11	280	141.561	Nahtübergang
1.12	340	66.316	Nahtübergang
2.1	300	120.649	Nahtübergang
2.2	279	231.938	Nahtübergang
2.3	227	333.866	Nahtübergang
2.4	175	1.017.164	Nahtübergang
2.5*	122	(3.000.001)	ohne Versagen
2.5H	300	124.635	Nahtübergang
2.6	140	1.801.883	Nahtübergang
2.7	300	58.102	Nahtübergang
2.8	227	165.816	Nahtübergang
2.9	175	488.755	Nahtübergang
2.10	207	99.605	Nahtübergang
2.11	122	1.321.677	Nahtübergang
2.12	144	643.787	Nahtübergang
3.1	300	120.649	Nahtwurzel
3.2	280	79.361	Nahtwurzel
3.3	227	227.398	Nahtübergang
3.4	252	182.797	Nahtwurzel
3.5	170	1.077.601	Nahtwurzel
3.6	280	137.547	Nahtwurzel
3.7	210	671.675	Nahtübergang
3.8	130	1.001.537	Nahtwurzel
3.9	150	1.737.766	Nahtwurzel
3.10	190	111.929	Nahtübergang
3.11	265	111.111	Nahtwurzel
3.12	190	770.013	Nahtübergang

* Versuchskörper, die kein Risswachstum zeigten und erneut auf einem höheren Prüfniveau getestet wurden.

Bei einer Ausführung nach der traditionell deutschen Variante (Serie 1 und 2) initiiert der zum Versagen führende Ermüdungsanriss immer vom Schweißnahtübergang ausgehend. Ein Großteil der Versuchskörper der Serie 3 hingegen versagte infolge eines Risswachstums von der Schweißnahtwurzel ausgehend.

7.4.2 Bruchflächenanalyse

Fracture surface analysis

In Bild 7-19 sind beispielhaft die Bruchflächenanalysen von drei Prüfkörpern dargestellt. Die Prüfkörper der Serie 1 und 2, die sich am traditionell deutschen Detail orientieren, versagten ausschließlich im Grundblech. Dabei initiierte der Riss ausgehend vom Schweißnahtübergang in das Grundblech. Der Rissausgangspunkt trat an unterschiedlichen Stellen entlang des Schweißnahtübergangs aus. In keinem Fall konnte ein Risswachstum ausgehend von dem seitlichen Übergang zur Flankennaht beobachtet werden. In Bild 7-19 (a) und (b) sind typische Rissfronten dargestellt.

Prüfkörper, bei denen ein Wurzelversagen festgestellt wurde, wiesen ein grundsätzlich anderes Verhalten auf. Der Riss startete hier an der Wurzel und wurde erst sichtbar, als der Riss die Schweißnahtoberfläche erreichte, vgl. Bild 7-19 (c). Eine Analyse der Bruchflächen zeigt, dass alle beobachteten Wurzelrisse nach Außen wanderten, nicht nach Innen in Richtung des Grundblechs. Erst mit fortschreitender Belastung breitete sich der Riss über die komplette Länge der Schweißnaht aus und wanderte schließlich über die seitlichen Flankennahte in das Grundblech. Das Versagen der Prüfkörper wurde schließlich durch den Ermüdungsrisse im Grundblech ausgelöst. Da der versagenskritische Riss im Grundblech erst nach dem Durchschreiten der Schweißnaht ausgelöst wurde, waren die Risswachstumsphasen der Versuchskörper mit Wurzelversagen deutlich länger. Beispielsweise wurde bei PK 3.5 ein sichtbarer Riss bei 514.000 Schwingspielen dokumentiert. Das Versagen des Prüfkörpers wurde erst bei über 1.077.000 Schwingspielen erreicht. So machte die (sichtbare) Risswachstumsphase mehr als die Hälfte der Gesamtlebenszeit des Prüfkörpers aus. Für Prüfkörper mit Risswachstum vom Schweißnahtübergang ausgehend betrug der Anteil der Risswachstumsphase dagegen maximal $\frac{1}{4}$ der Gesamtlebensdauer.

Grundsätzlich wurden bei einem Großteil der Prüfkörper mehrere voneinander unabhängige Ermüdungsrisse dokumentiert.

Eine vollständige Dokumentation der Bruchflächen und der beobachteten Risswachstumsphasen für alle Prüfkörper ist in [119] gegeben.



Bild 7-19: Bruchflächen: Rissfronten im Grundblech: PK 2.1 (a), PK 2.10 (b), Rissfronten in die Schweißnaht bei Wurzelversagen: PK 3.6 (c)

Figure 7-19: Fracture surface: crack front in ground plate: (PK 2.1 (a), PK 2.10 (b), crack front in the weld (root failure): PK 3.6 (c)

Insgesamt wird festgestellt, dass sich bei Prüfkörpern mit Risswachstum von der Wurzel das Versagen deutlich länger ankündigt als bei Prüfkörpern mit Risswachstum am Schweißnahtübergang. Obwohl Risse an der Wurzel zunächst nicht sichtbar sind, ist die Versagenscharakteristik aufgrund der ausschließlich nach außen wachsenden Risse und der verlängerten Risswachstumsphase vorteilhaft.

7.4.3 Analyse von Makroschliffen

Analysis of macrosections

In Bild 7-20 sind Makroschliffe mit typischen Ermüdungsrissen eingezeichnet. In Serie 1 und 2 gingen alle Ermüdungsrisse vom Schweißnahtübergang aus, vgl. Bild 7-20 (a) und (b). Ein großer Teil der Versuchskörper von Serie 3 versagte ausgehend von der Schweißnahtwurzel vgl. Bild 7-20 (c). Die Tendenz, dass bei flacher werdendem Nahtübergang und kleiner werdender Schweißnaht die maßgebende Kerbe zur Schweißnahtwurzel wandert, lässt sich auch in numerischen Berechnungen darstellen, vgl. Kapitel 7.5.4.

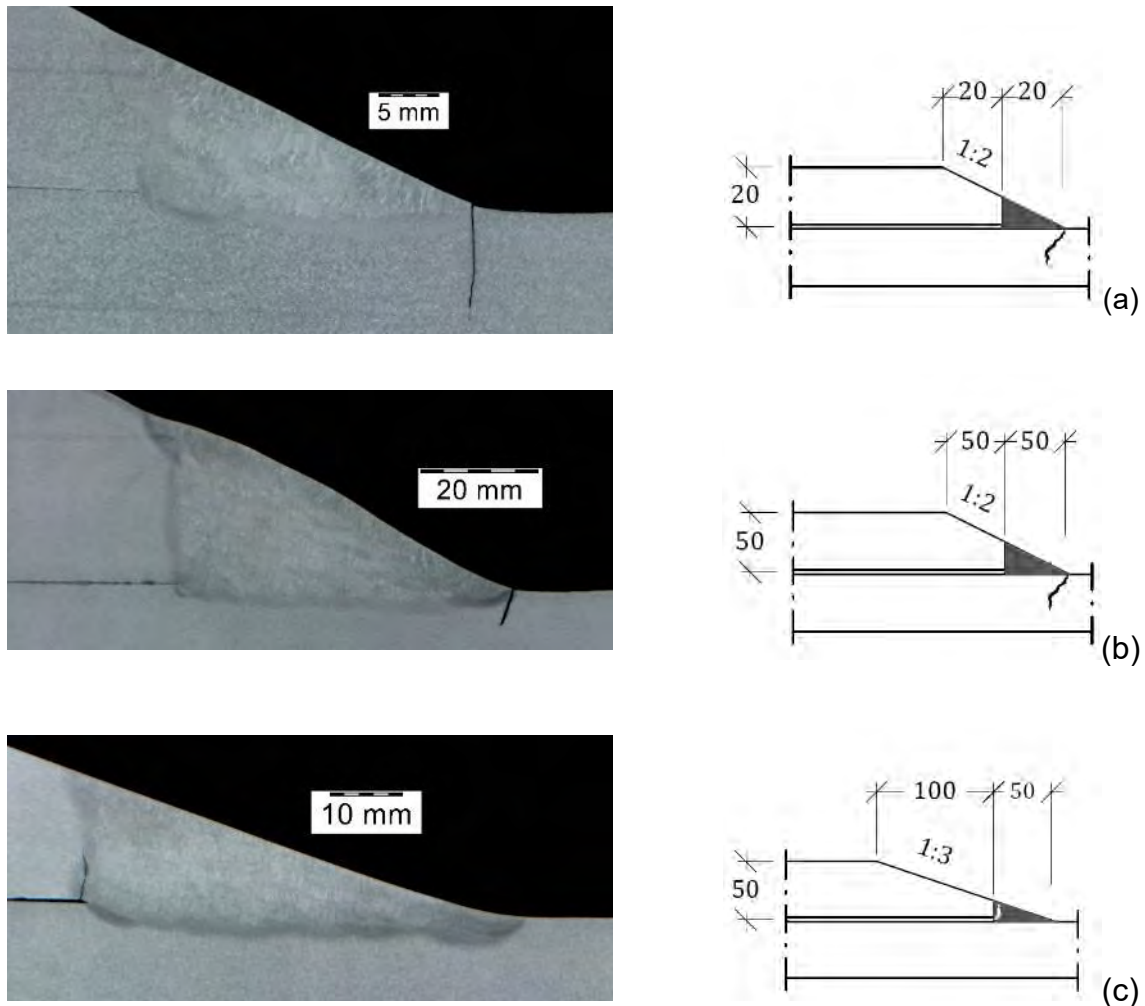


Bild 7-20: Makroschliffe mit Ermüdungsrissen: Serie1 (a), Serie 2 (b), Serie 3 (c)

Figure 7-20: Macrosections with fatigue cracks: series 1 (a), series 2 (b), series 3 (c)

7.4.4 Analyse der Dehnungsmessungen

Analysis of strain measurement

Neben dem Prüfen nicht planmäßiger Biegespannungen, sowie dem Überprüfen der aufgetragenen Nennspannungen im Versuch eignen sich die applizierten Dehnmessstreifen auch für die Vorhersage eines Prüfkörpersversagens. Vor dem Erreichen eines Bruchereignisses weichen die Dehnungsschwingbreiten von einem konstanten Wert ab. Der Zeitpunkt der Vorhersage ist dabei vom Abstand der DMS zu dem sich einstellenden Riss abhängig. Zudem zeigten die auf dem Grundblech applizierten DMS in der Regel nur Grundblechversagen an.

Bei den im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten Messungen waren die Risse optisch in der Regel deutlich früher sichtbar. Die Ableitung von Risswachstumsphasen rein aus den Messungen der Dehnmessstreifen ist ungenau und eher nicht empfehlenswert.

In Bild 7-21 sind Dehnungsmessungen über die Laufzeit des Prüfkörper PK 2.9 abgebildet. Dargestellt sind die minimalen und maximalen gemessenen Dehnungen je Schwingspiel in den gegenüberliegenden DMS 3 und DMS 4, die in einem Abstand von 100 mm von der späteren Bruchfläche appliziert wurden.

Zusätzlich ist der Zeitpunkt dargestellt, ab dem Risswachstum optisch beobachtet werden konnte.

Eine Auswertung der Dehnungsverläufe aller Prüfkörper ist in [119] gegeben.

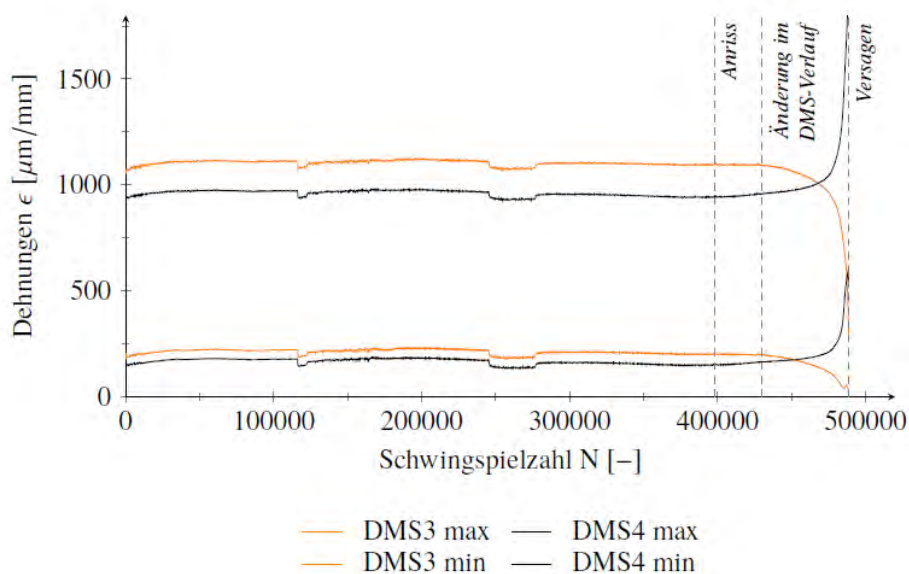


Bild 7-21: Dokumentation der gegenüberliegenden DMS 3 und DMS 4 im Abstand von 100 mm von PK 2.9

Figure 7-21: Test specimen shortly before total rupture (PK 2.8)

7.4.5 Analyse des Blechdickeneinflusses

Analysis of plate thickness effect

Serie 1 und Serie 2 wurden für die Ermittlung eines Blechdickeneinflusses gestaltet. Beide Serien orientieren sich an der traditionell deutschen Variante des Konstruktionsdetails und

unterscheiden sich nur hinsichtlich der Blechdicke.

Ein direkter Vergleich der in Tabelle 7-3 dargestellten Ermüdungsfestigkeiten ist jedoch nicht möglich. Ursächlich sind die in Kapitel 7.2.3.3 bereits beschriebenen Restkerben bei einigen Versuchskörpern der Serie 2, die zu deutlich verringerten Ermüdungsfestigkeiten geführt haben.

Um diesen Fertigungseinfluss auszuschließen wurden ausschließlich Prüfkörper eines Herstellers ausgewertet: Pk 1.1 bis Pk 1.6 sowie Pk 2.1 bis 2.6.

Die sich aus den Versuchsergebnissen ergebenden Regressionsgeraden sind in Bild 7-22 dargestellt.

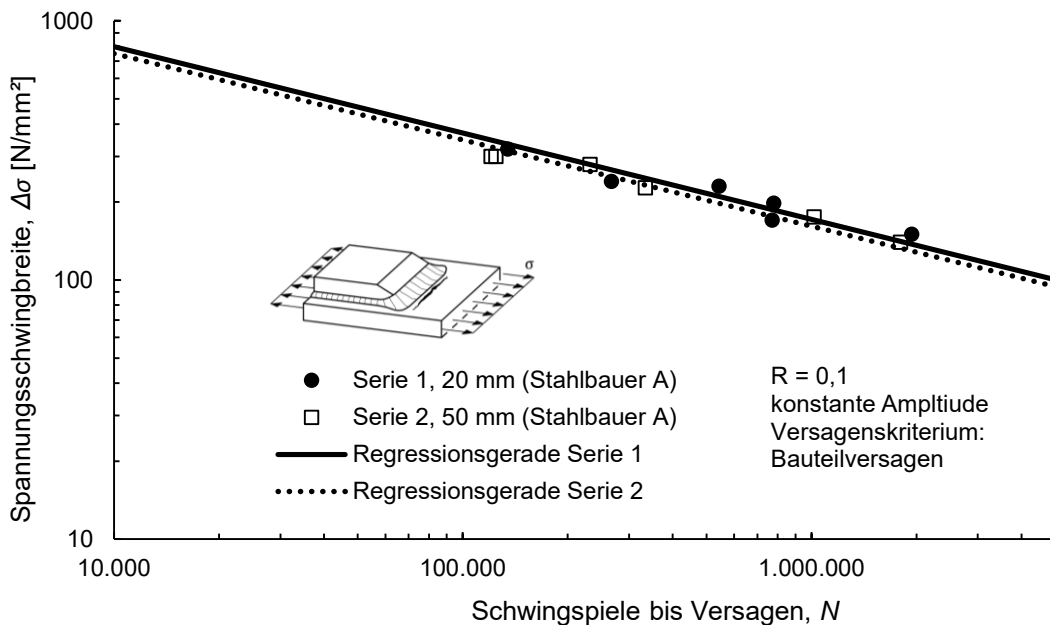


Bild 7-22: Blechdickeneinfluss: Vergleich der Regressionsgerade Serie 1 und Serie 2

Figure 7-22: Plate thickness effect: Comparison of mean S-N curve series 1 and series 2

Für die Bewertung der Versuchsergebnisse aus den beiden Serien wird ein Zwei Stichproben t-Test herangezogen (vgl. Bild 7-23). Dieser bildet auf Grundlage der t-Verteilung ein Konfidenzintervall über die mittleren Regressionsgeraden. Ein Blechdickeneinfluss kann als signifikant angenommen werden, wenn ein Signifikanzniveau kleiner 5 % erreicht ist. Dabei beschreibt das Signifikanzniveau im Prinzip die Fläche der Überschneidung der beiden t Verteilungen in Bild 7-23. In diesem konkreten Fall liegt ein Signifikanzniveau von über 25 % vor. Damit liefern die beiden Serien keinen signifikanten Unterschied in Hinsicht auf die Ermüdungsfestigkeit. Ein Blechdickeneinfluss kann auf Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse damit ausgeschlossen werden.

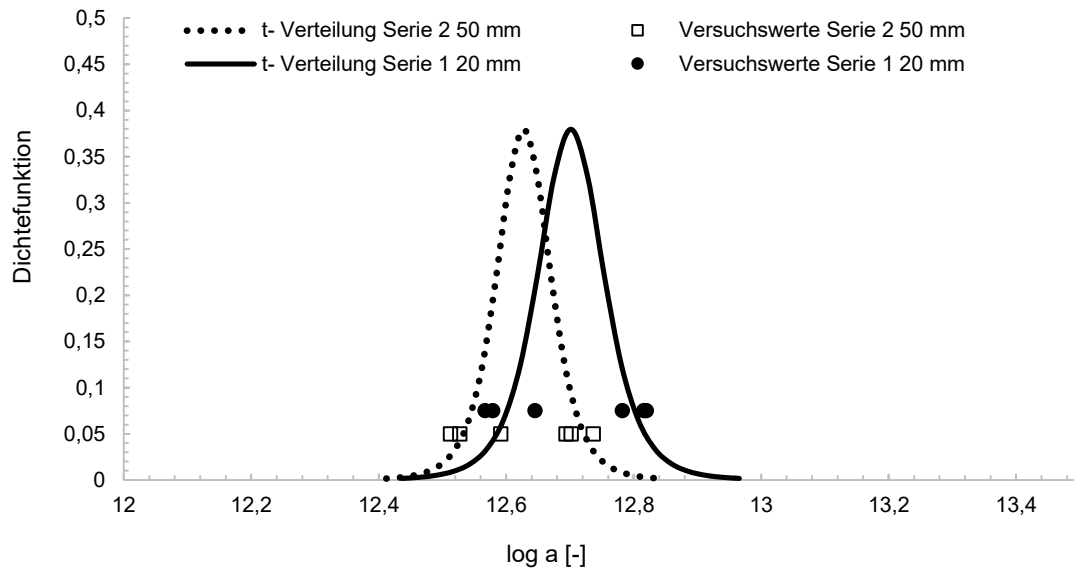


Bild 7-23: Blechdickeneinfluss: Zweistichproben t-Test
Figure 7-23: Plate thickness effect: two-sample t-test

7.4.6 Fazit und statistische Auswertung der Versuche
Conclusions and statistical Analysis

In Bild 7-24 ist die statistische Auswertung zur Herleitung eines charakteristischen Kerbfalls der Serie 1 dargestellt.

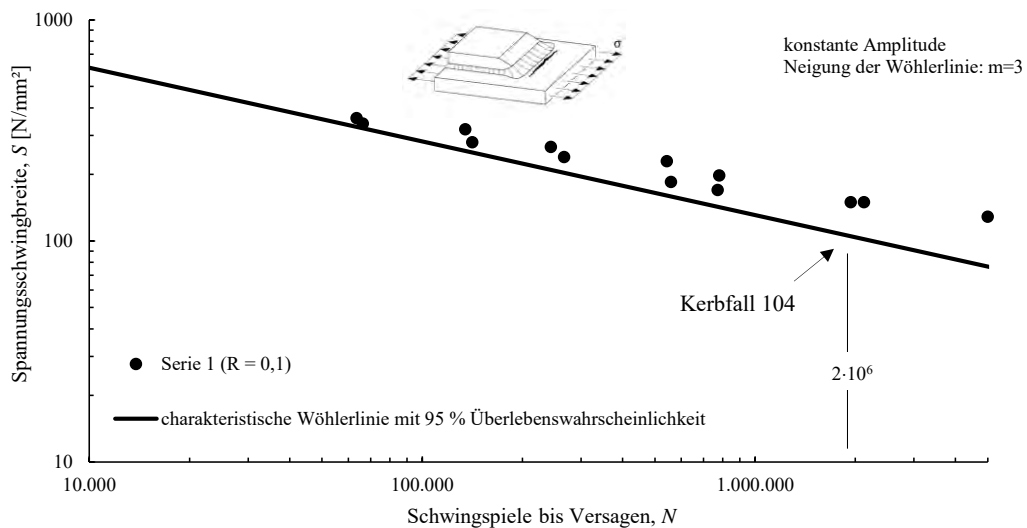


Bild 7-24: Statistische Auswertung Serie 1
Figure 7-24: Statistical Analysis of series 1

In Bild 7-25 ist die statistische Auswertung zu Serie 2 dargestellt. Aufgrund der deutlichen Herstellungseinflüsse in Bezug auf die Restkerbe sind die entsprechenden Versuchskörper getrennt dargestellt. Die statistische Auswertung erfolgt gemeinsam.

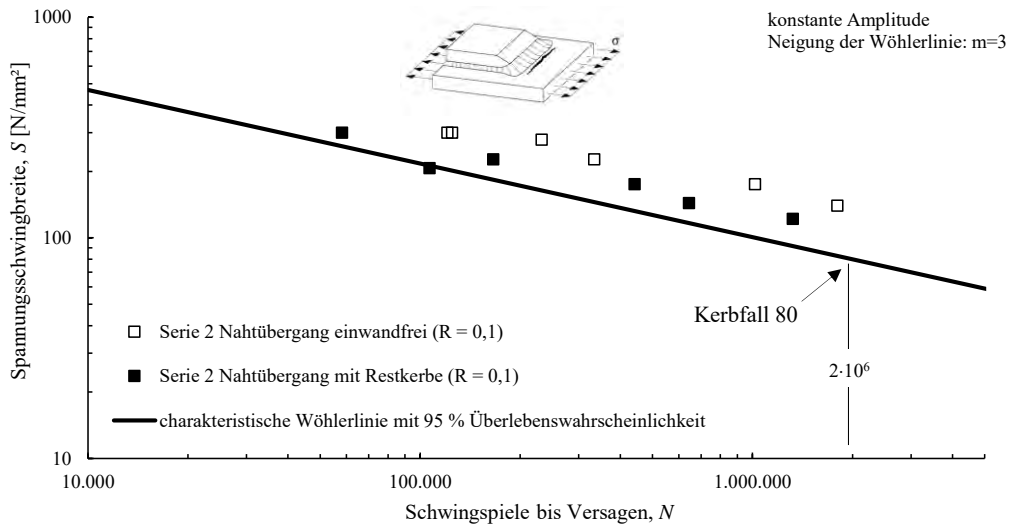


Bild 7-25: Statistische Auswertung Serie 2

Figure 7-25: Statistical Analysis of series 2

In Bild 7-26 ist die statistische Auswertung zu Serie 3 dargestellt.

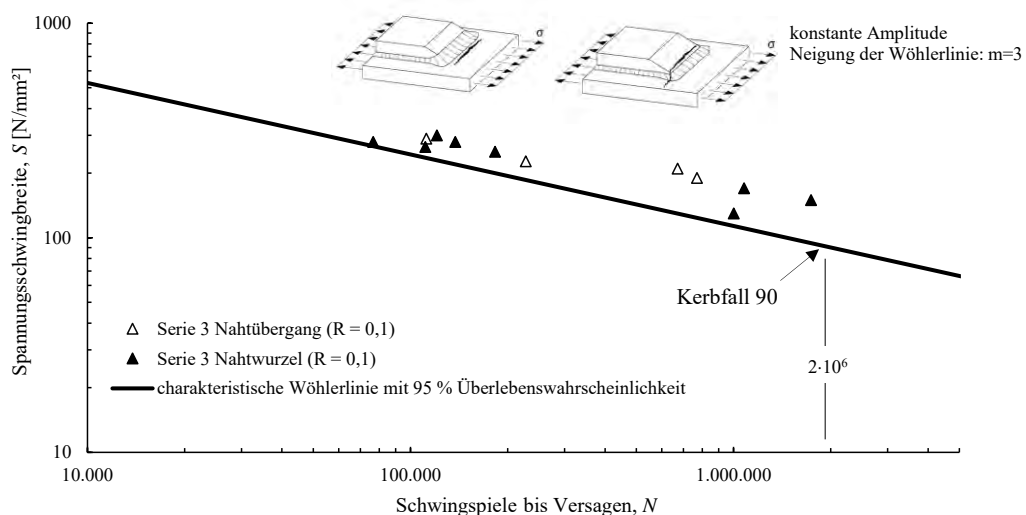


Bild 7-26: Statistische Auswertung Serie 3

Figure 7-26: Statistical Analysis of series 3

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Ermüdungsfestigkeit durch sorgfältige Bearbeitung des Schweißnahtübergangs deutlich verbessert werden kann, vgl. Bild 7-25. Zudem zeigte sich, dass bei einer Ausführung nach der traditionell deutschen Variante der zum Versagen führende Ermüdungsanriss immer vom Schweißnahtübergang ausging. Ein Großteil der Versuchskörper der Serie 3 hingegen versagte infolge eines Risswachstums von der Schweißnahtwurzel.

Versuche mit Risswachstum von der Schweißnahtwurzel zeigen eine deutlich verlängerte Risswachstumsphase.

Mithilfe von Dehnmesssteifen können Biegeeinflüsse dokumentiert werden. Diese werden für die Ermittlung der Nennspannungen jedoch vernachlässigt.

Ein Vergleich der Wöhlerlinien von Serie 1 und Serie 2 mit einwandfreien Nahtübergängen zeigt, dass kein Blechdickeneinfluss zu erwarten ist.

Alle Serien liefern Ermüdungsfestigkeiten die deutlich über dem derzeitigen Kerbfall 71 aus Eurocode 3 Teil 2/NA [94] liegen.

7.5 Numerische Untersuchungen

Numerical study

7.5.1 Übersicht

Overview

Für die Bewertung von strukturmechanischen Einflussgrößen wurden FE Untersuchungen an unterschiedlichen Geometrien durchgeführt. Neben der Modellierung der in Kapitel 7.2.3 beschriebenen Versuchskörper wurden auch Geometrien ohne kerbfreie Bearbeitung und ohne dicke Stirnnaht modelliert. Für die Betrachtung möglicher zusätzlicher Einflussgrößen in Bauteilen wurden Gurtlamellenenden in Trägergeometrien unter Biegebeanspruchung simuliert. Die Bewertung erfolgt dabei anhand des maximalen Kerbspannungsfaktors am Nahtübergang bzw. an der Nahtwurzel. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der numerischen Untersuchungen zusammengefasst.

Eine detaillierte Beschreibung und Validierung des FE Modells ist im Anhang 26 gegeben. Zudem sind dort weitere Parameterstudien dokumentiert.

7.5.2 Blechdickeneinfluss

Plate thickness influence

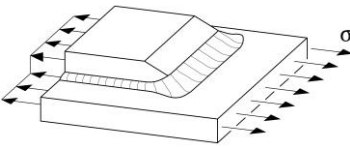
Ein Vergleich der im FE Modell ermittelten Kerbspannungsfaktoren zwischen Serie 2 und Serie 1, zeigen sowohl am Nahtübergang als auch an der Nahtwurzel erhöhte Werte für Serie 2, vgl. Tabelle 7-4. Weitere Untersuchungen im FE Modell zeigten, dass die variierenden Kerbspannungen primär von der Grundblechdicke abhängen. Der Einfluss kann mit üblichen Formeln zur Berücksichtigung von Blechdickeneinflüssen, z.B. nach [16] auch analytisch abgebildet werden.

Der Einfluss wird in den experimentellen Untersuchungen dagegen nicht sichtbar, vgl. Kapitel 7.4.5. In [36] ist anhand experimenteller Daten dargelegt, dass der Blechdickeneinfluss bei kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen deutlich geringer ausgeprägt ist als bei Nahtübergängen, die im Schweißzustand belassen wurden. Untersuchungen und Auswertungen an einer Vielzahl von Ermüdungsversuchen im laufenden Forschungsvorhaben zeigen auf, dass Blechdickeneinflüsse im Kerbspannungsmodell möglicherweise überschätzt werden, vgl. Kapitel 9.2.4.1.

Da die experimentellen Daten keinen Blechdickeneinfluss aufzeigen, wird dieser für die Kerbfalleinstufung in Tabelle 7-8 vernachlässigt.

Tabelle 7-4: Blechdickeneinfluss in der FE

Table 7-4: Influence of plate thickness in FEM

Schematische Darstellung	Blechdicke	Kerbspannungsfaktor Nahtübergang	Kerbspannungsfaktor Nahtwurzel
	20 mm (Serie 1) 50 mm (Serie 2)	2,5 3,0	3,0 3,0

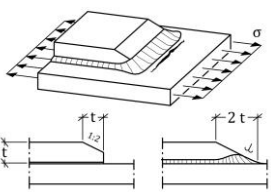
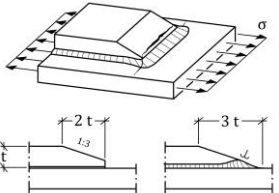
7.5.3 Nahtgeometrie

Geometry of the weld

Das der Serie 3 entsprechende FE Modell weist gegenüber der Serie 2 einen flacheren Nahtanstiegswinkel sowie ein verringertes Schweißnahtvolumen auf. Die Kerbe an Nahtübergang profitiert davon und weist eine deutlich verringerte Kerbspannung auf. Dagegen ist der Kerbspannungsfaktor an der Nahtwurzel deutlich erhöht, vgl. Tabelle 7-5. Diese Tendenz ließ sich auch in den experimentellen Untersuchungen nachvollziehen. Ein Großteil der Versuchskörper versagte ausgehend von der Nahtwurzel, vgl. Tabelle 7-3. In einer weiteren Parameterstudie wurde an der Geometrie der Serie 2 der Übergang der Stirnnaht zur Flankenkehlnaht untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass der Kerbspannungsfaktor nahezu unbeeinflusst vom Eckradius der Schweißnaht und der Länge des Übergangs ist. Sowohl die FE Modelle als auch die Experimente zeigten zudem, dass die maximale Spannungskonzentration bzw. die Anrissstelle in der Regel mittig in der Stirnnaht liegt.

Tabelle 7-5: Nahtgeometrie in der FE

Table 7-5: Influence of weld geometry in FEM

Schematische Darstellung	Steigung	Kerbspannungsfaktor Nahtübergang	Kerbspannungsfaktor Nahtwurzel
	1:2 (wie Serie 2)	3,0	3,0
	1:3 (wie Serie 3)	2,4	3,8

7.5.4 Kerbschärfe und Schweißnahtdicke

Sharpness of the notch and weld thickness

Für die Modellierung der kerbfreien Bearbeitung wurde ein fiktiver Kerbkrümmungsradius ϱ_f von 2 mm angesetzt, (siehe Modellbeschreibung in Anhang 26). Wird der Kerbkrümmungsradius ϱ_f auf den in [120] und [16] empfohlenen Wert von 1 mm reduziert, entspricht das im Modell einer im Schweißzustand belassenen Kerbe. Die Anfasung der Lamelle,

die im Wesentlichen einer optimalen Werkzeugführung bei der Nachbearbeitung der Kerbe dient, entfällt.


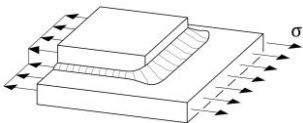
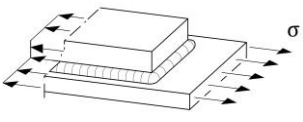
Die Berechnungen zeigen, dass der Kerbspannungsfaktor dadurch um 17 % im Vergleich zum kerbfrei bearbeiteten Nahtübergang zunimmt. Der Kerbspannungsfaktor an der Wurzel bleibt konstant.

Einen großen Einfluss hat die Schweißnahtdicke. Eine Modellierung der Geometrie nach Serie 2 mit einer die Lamelle umlaufenden Kehlnaht von 7 mm Dicke und ohne verstärkte Stirrnaht führt zu einem über 300 % erhöhten Kerbspannungsfaktor.

Insbesondere die Schweißnahtdicke der Stirrnaht ist demnach maßgebend für die Ermüdungsfestigkeit. Je dicker die Schweißnaht ist, desto besser ist die Ermüdungsfestigkeit, vgl. Tabelle 7-6.

Tabelle 7-6: Kerbschärfe und Schweißnahtdicke in der FE

Table 7-6: Influence of the notch and the weld thickness in FEM

Schematische Darstellung	Geometrie	Kerbspannungsfaktor Nahtübergang	Kerbspannungsfaktor Nahtwurzel
	wie Serie 2	3,0	3,0
	Serie 2 ohne kerbfreie Bearbeitung und ohne Anfasung	3,5	3,0
	ohne verstärkte Stirrnaht (a = 7 mm umlaufend) ohne Anfasung	8,2	9,4

7.5.5 Modellierung Gurtlamellenende in Trägergeometrie

Modeling of transverse end welds of cover plates in girders geometry

Alle untersuchten Versuchskörper wurden symmetrisch ausgebildet und sind damit unbeeinflusst von planmäßigen Biegebeanspruchungen. Bei Kleinversuchskörpern mit einseitig aufgeschweißter Lamelle wäre aufgrund der Biegedruckspannungen auf der Lamellenseite ein positiv wirkender Biegeeinfluss zu erwarten. Eine andere Situation ergibt sich bei Biegeträgern. Aufgrund der lokalen Exzentrizität von verstärktem und unverstärktem Gurt ergibt sich ein Versatzmoment, das zu einer lokalen Verformung des Gurtes (vgl. Bild 7-28) und damit zu veränderten Kerbspannungsfaktoren am Nahtübergang und an der Nahtwurzel führt.

Beispielhaft wurden die Kerbspannungsfaktoren für die Serie 1 in einer möglichen Trägergeometrie unter Momentenbeanspruchung berechnet. Dafür wurde ein 200 mm hoher und 10 mm dicker Steg mit einer 3 mm dicken Stegnaht zwischen den Gurten modelliert. Die Gurt- und Lamellenendgeometrie entspricht der Serie 1, vgl. Kapitel 7.2.2. Während die Kerbspannung an der Wurzel reduziert wird, nehmen die Kerbspannungen am Schweißnahtübergang tendenziell zu. Der Einfluss ist maßgeblich abhängig von der Trägergeometrie. Insbesondere das Verhältnis der Gesamtblechdicke (Gurt mit Lamelle) zur

Grundblechdicke sowie die Schlankheit der Flansche beeinflussen die Kerbspannungsfaktoren.

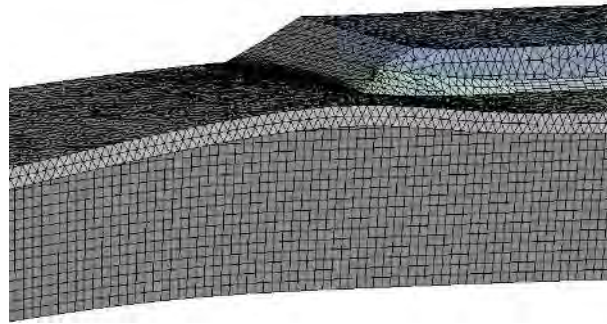


Bild 7-27: Lokale Verformung des Gurtes im FE Globalmodell infolge der lokalen Exzentrizität (Verformungen überhöht)

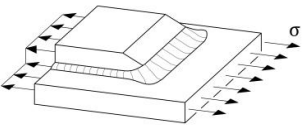
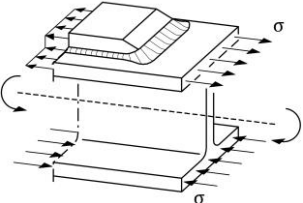
Figure 7-27: Local deformation of the flange in FE global model due to the local eccentricity (magnified deformations)

Der Effekt ist für Gurtdickensprünge an geschweißten Biegeträgern bekannt. Die Autoren der Untersuchungen in [121] schlagen einen Erhöhungsfaktor für die einwirkende Nennspannungsschwingbreite zur Berücksichtigung der Zusatzbeanspruchungen aus der Exzentrizität vor. Experimentelle Untersuchungen an Gurtlamellenenden in [112] und [114] beinhalten sowohl Kleinversuche als auch Trägerversuche an Gurtlamellenenden. Dabei wurde hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit kein signifikanter Unterschied festgestellt.

Für den Kerbfallvorschlag in Kapitel Tabelle 7-8 wurden Trägerversuche aus [115] berücksichtigt. Basierend auf dem derzeitigen Kenntnisstand wird davon ausgegangen, dass eine Korrektur der Einwirkungen auf Nennspannungsbasis für Biegeträger nicht notwendig ist.

Tabelle 7-7: Modellierung Gurtlamellenende in Trägergeometrie in der FE

Table 7-7: Modeling of transverse end welds of cover plates in girders geometry in FEM

Schematische Darstellung	Grundblechgeometrie	Kerbspannungsfaktor Nahtübergang	Kerbspannungsfaktor Nahtwurzel
	Serie 1	2,5	2,6
	Serie 1 in Trägergeometrie mit Momentenbeanspruchung	3,2	2,1

7.6 Kerbfallvorschlag für DIN EN 1993-1-9

Proposal for fatigue detail category in DIN EN 1993-1-9

Für die Herleitung eines Kerbfalls für das Kerbdetail Gurtlamellenende wurden alle in Tabelle 7-3 aufgeführten Wöhlerversuche gemeinsam ausgewertet. Zusätzlich wurden acht Trägerversuche von Berger aus [115] berücksichtigt, die bei höherer Mittelspannung ($R = 0,5$) getestet wurden. Damit stehen insgesamt 44 Versuche zur Verfügung. Die Versuche

entsprechen alle der traditionell deutschen Variante des Konstruktionsdetails, berücksichtigen aber unterschiedliche Hersteller, Blechdicken, Bauteilformen und Mittelspannungen im Zugschwellbereich. Die Versuchsergebnisse sind zusammen mit der charakteristischen Wöhlerlinie für 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit in Bild 7-28 dargestellt. Aus der statistischen Auswertung berechnet sich der charakteristische Kerbfall 86.

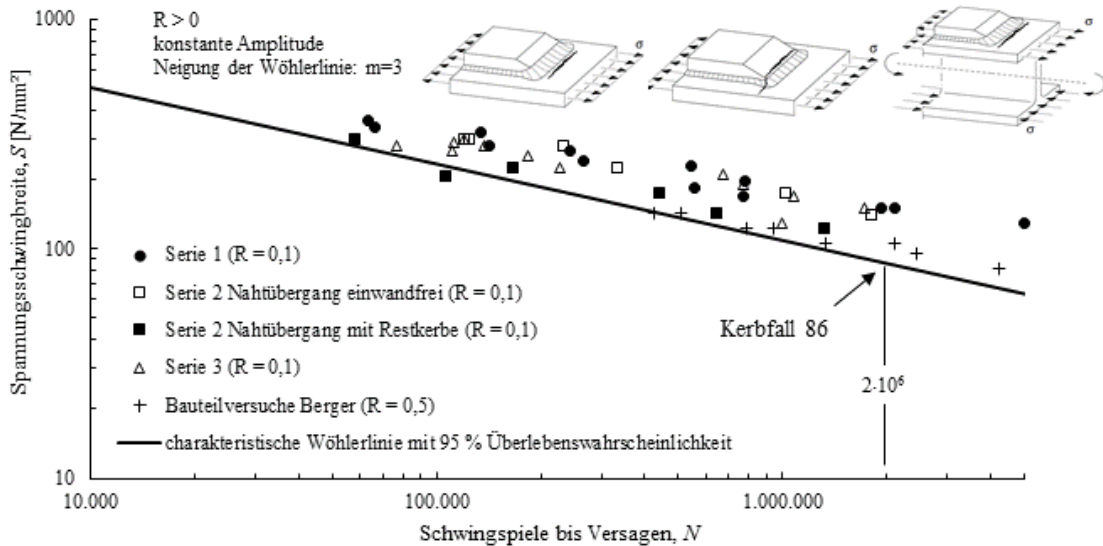


Bild 7-28: Statistische Auswertung für Kerbfallempfehlung

Figure 7-28: Statistical Analysis for fatigue detail proposal

Basierend auf den in Bild 7-28 dargestellten experimentellen Untersuchungen für die traditionell deutsche Variante, einschließlich der untersuchten Variante mit reduziertem Schweißnahtvolumen, wird für DIN EN 1993-1-9 [1] der Kerbfall 80 vorgeschlagen. Tabelle 7-8 zeigt einen Vorschlag für die Ergänzung der Kerbfalltabelle. Die Variante mit reduziertem Schweißnahtvolumen wird dabei aufgrund des möglichen Versagens ausgehend von der Nahtwurzel als eigenes Detail aufgeführt.

Tabelle 7-8: Kerbfallvorschlag

Table 7-8: Proposal of fatigue detail

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80			Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Trägern, Steigung der Stirnnaht und Lamelle 1:2	Stirnnaht ist blecheben zu bearbeiten, Nahtübergang kerbfrei bearbeitet, Heftnähte an Stirnseite vermeiden
80			Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Trägern, Steigung der Stirnnaht und Lamelle 1:3	Stirnnaht ist blecheben zu bearbeiten, Nahtübergang kerbfrei bearbeitet, Heftnähte an Stirnseite vermeiden

8 Experimentelle Untersuchungen zum Stirnplattenstoß mit vorgespannten Schrauben

Experimental investigations on end plate connections with prestressed bolts

Kurzfassung

Es wurden Ermüdungsversuche an 3 Varianten der Stirnplattenverbindung mit vorgespannten Schrauben durchgeführt. Zusätzlich wurden Kleinprobenversuche an T- und L-Stößen durchgeführt. In einer nachfolgenden numerischen Untersuchung wurden verschiedene Geometrieinflüsse untersucht und bewertet. Schließlich wird eine Kerbfallempfehlung präsentiert.

Abstract

Fatigue tests were carried out on 3 variants of the end plate connection with prestressed bolts. In addition, small-scale specimen tests were performed on T- and L-joints. In a subsequent numerical investigation, various geometric influences were investigated and evaluated. Finally, a fatigue detail recommendation is presented.

8.1 Anlass

Occasion

Neben der Neuauswertung der Kerbdetails, die in Abschnitt 6 erläutert wurde, besteht bei einigen Details weiterer Untersuchungsbedarf. Dies betrifft abgesehen von dem Gurtlattenende (siehe Abschnitt 7) auch die Stirnplattenverbindung mit vorgespannten Schrauben. Dieses Konstruktionsdetail stellt eine wirtschaftliche und montagefreundliche Anschlusskonstruktion in der Stahlbau-Praxis dar und kommt typischerweise bei Kranbahnen vor, die einer enormen Ermüdungsbeanspruchung ausgesetzt sind.

Die Ermüdungsbemessung einer Stirnplattenverbindung ist in DIN EN 1993-1-9 [1] bisher jedoch unzureichend erfasst. Die Schweißnähte, die den Kranbahnträger mit der Stirnplatte verbinden, sind nach Tabelle 8.5 der DIN EN 1993-1-9 [1] nachzuweisen, siehe Abschnitt 6.4.1. In jedem Fall ist der Schweißnahtübergang nach Detail 1 oder 2 nachzuweisen. Die beiden Details besitzen die gleichen Kerbfallklassen inklusive Geometrieinfluss. Sie unterscheiden sich lediglich durch die Annahme eines „verformbaren Anschlussblech“ bei Detail 2, welches mit korrigierten Nennspannungen bemessen werden muss. Die Norm gibt jedoch keinerlei Hinweise, in welchen Fällen der Anwender ein verformbares Anschlussblech anzunehmen hat. Wenn es sich um nicht voll durchgeschweißte Nähte oder Kehlnähte handelt, muss zusätzlich zum Nachweis des Schweißnahtübergangs ein Versagen der Schweißnahtwurzel nach Detail 3 ausgeschlossen werden. Eine ausreichende Ermüdungsfestigkeit gegenüber Schubbeanspruchung muss gemäß Detail 8 nachgewiesen werden. Abgesehen von der Schweißnaht stellt die Schraube das zweite ermüdungsbeanspruchte Detail der Verbindung dar. Hierzu verlangt die Norm die Berechnung der wahren Schraubenkraft unter Berücksichtigung von Abstützkräften sowie Vorspannverlusten. Dabei fehlen auch an dieser Stelle konkrete Angaben zur Be-

stimmung der einwirkenden Spannungen. Im Rahmen der in diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchungen an der RWTH Aachen sollen die Schweißnaht- und die Schraubenspannungen bei der Ermüdungsbelastung von Stirnplattenverbindungen näher betrachtet werden, um die offenen Fragen bei deren Ermüdungsbemessung zu klären.

8.2 Der Stirnplattenstoß von Kranbahnträgern

The end plate connection of crane runway girders

8.2.1 Allgemeines

General

Neben Schweißprofilen eignen sich HEA-, HEB- und HEM-Walzprofile als Kranbahnträger, wobei letztere nur bei großen Radlasten wirtschaftlich sind. Wenn bei Kranbahnen z.B. aufgrund von schwerem Kranbetrieb eine Knicklosigkeit der Biegelinie zur Laufruhe der Kranbrücke erforderlich ist, sind biegesteife Stöße der Kranbahnträger notwendig, siehe Bild 8-1 [122].

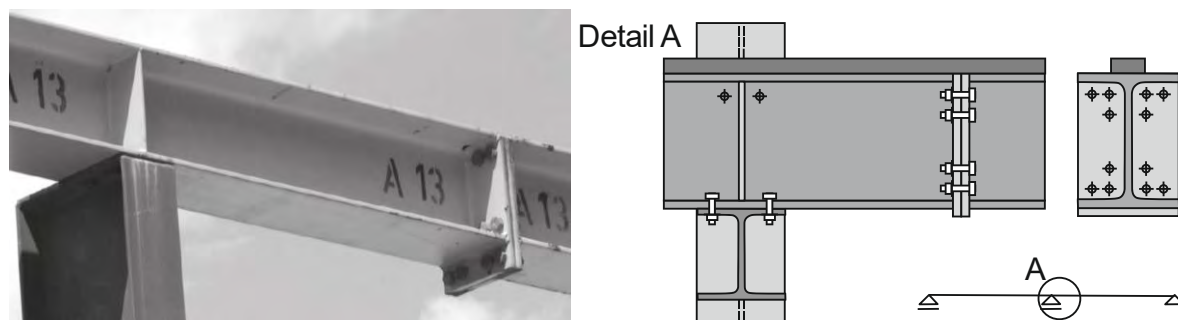


Bild 8-1: Biegesteife Stöße von Kranbahnträgern im Feld [123]

Figure 8-1: Moment-resistant connections of crane runway girders in the bay [123]

Die Kraftübertragung der Stirnplattenverbindung wird dabei durch Wahl der Kopfplattenart, bündig oder überstehend, und die Anzahl und Anordnung der Schrauben beeinflusst. Ein Stirnplattenüberstand kommt aufgrund der durchlaufenden Kranschiene nur auf der Biegezugseite in Frage. Die auf der Biegezugseite stark konzentrierte Kraftweiterleitung durch die Schrauben verlangt Verbindungsmittel mit hoher Festigkeit hinsichtlich Tragfähigkeit und Ermüdung. Gewöhnlich werden vorgespannte hochfeste Schrauben mit der Güte 10.9 verwendet.

8.2.2 Tragverhalten der Stirnplattenverbindung mit vorgespannten Schrauben

Load bearing behaviour of end plate connections with prestressed bolts

Das Tragverhalten der Stirnplattenverbindung hängt stark von der Geometrie der Verbindung ab. Unterschiedliche Profiltypen, und -abmessungen, unterschiedliche Arten und Abmessungen der Stirnplatten und Schrauben sowie deren Anordnung führen zur Komplexität des Berechnungsverfahrens. Durch die Schraubenverbindungen entstehen lokale Spannungserhöhungen an den Schweißnähten. Die Schrauben einer Stirnplattenverbindung erhalten neben den entstehenden Biegespannungen zusätzliche Zugkräfte aus Abstützkräften der verformten Platte aufgrund deren elastischer Nachgiebigkeit, siehe Bild 8-2. Die Größe dieser Nachgiebigkeit führt auch zur Diskussion, ob es sich um ein „verformbares“ Anschlussblech handelt, was die Ermüdungsbemessung beeinflusst, vgl. Abschnitt 8.1.

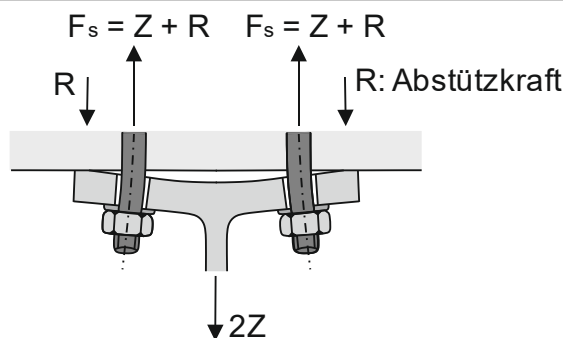


Bild 8-2: Abstützkräfte bei auf Zug belasteten Schraubenanschlüssen

Figure 8-2: Prying forces of bolted connections subjected to tensile loads

Zur statischen Auslegung von Stirnplattenverbindungen enthält EN 1993-1-8 [64] ein Berechnungsverfahren auf Basis des äquivalenten T-Stummels. Jeder Schraube wird dabei ein T-Stummel mit einer effektiven wirksamen Länge zugewiesen. Auf Basis des T-Stummels können ebenfalls die Schweißnähte bemessen werden. Tragfähigkeiten gängiger Stirnplattenverbindungen können Bemessungstabellen mit typisierten Anschlüssen entnommen werden [124].

Diese Regelungen betreffen jedoch nur die statische Tragfähigkeit der Stirnplattenverbindung. Im Ermüdungskontext werden typischer Weise vorgespannte Schrauben eingesetzt, die in der Stirnplattenverbindung ein nichtlineares Beanspruchungsverhalten aufweisen. Dieses nichtlineare Beanspruchungsverhalten der Schraube hat einen großen Einfluss auf das Tragverhalten der Stirnplattenverbindung und wird daher im Folgenden näher betrachtet. Der große Vorteil vorgespannter Schrauben besteht darin, dass der Großteil der äußeren Zugspannungsschwingbreite durch die geklemmten Stirnplatte, den Druckkörper, aufgenommen wird. Nur ein kleiner Anteil der Spannungsschwingbreite muss durch die Schraube aufgenommen werden. Diese Relation lässt sich am besten im Verspannungsdreieck der Schraube S und des Druckkörpers D darstellen, siehe Bild 8-3.

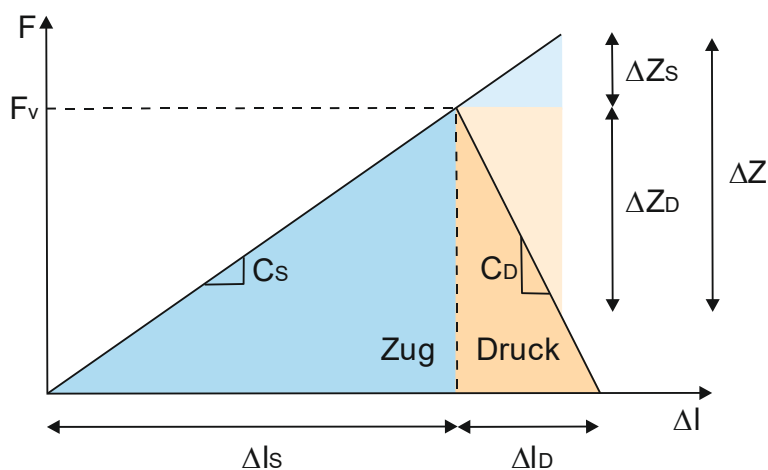


Bild 8-3: Verspannungsdreieck

Figure 8-3: Bolted joint diagram

Die Schraube wird mit der Vorspannkraft F_v vorgespannt. Dabei ergibt sich in Abhängigkeit der Steifigkeit der Schraube C_s und des Druckkörpers C_D eine Verlängerung der Schraube Δl_s und eine Stauchung des Druckkörpers Δl_D . Dabei ist die Steifigkeit der Schraube gängiger Weise geringer als die des Druckkörpers. Wenn nun eine äußere zentrische Zugbeanspruchung ΔZ auf das Klemmpaket aufgebracht wird, wird in Abhängigkeit

des Steifigkeitsverhältnisses ein kleinerer Anteil ΔZ_S über die Veränderung der Zugspannung in der Schraube und ein größerer Anteil über die Veränderung der Druckspannung im Druckkörper ΔZ_D abgetragen. Je kleiner die Steifigkeit der Schraube im Vergleich zum Druckkörper ist, desto kleiner ist der Anteil der von der Schraube aufzunehmenden Spannungsschwingbreite. Wenn die äußere Beanspruchung zum vollständigen Abbau der Druckspannungen im Druckkörper führt, muss die gesamte äußere Last von der Schraube aufgenommen werden, sodass dieser Fall ausgeschlossen werden sollte.

Die aufzubringenden Vorspannkkräfte sind in EN 1090-2 [99] und im deutschen nationalen Anhang der EN 1993-1-8 [125] geregelt, siehe Tabelle 8-1.

Tabelle 8-1: Vorspannkkräfte nach EN 1090-2 [99] und DIN EN 1993-1-8/NA [125]

Table 8-1: Prestressing forces according to EN 1090-2 [99] and DIN EN 1993-1-8/NA [125]

Festigkeitsklasse	Vorspannkraft [kN]								
		Schraubendurchmesser							
		M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M36
10.9	$F_{p,C}$	59	110	172	212	247	321	393	572
	$F_{p,C}^*$	50	100	160	190	220	290	350	510
$F_{p,C}$ Mindestvorspannkraft (volle Vorspannkraft) nach DIN EN 1090-2 [99]									
$F_{p,C}^*$ Regel-Vorspannkraft (reduzierte Vorspannkraft) nach DIN EN 1993-1-8/NA [125] (Muttern mit Molybdänsulfid oder gleichwertigem Schmierstoff behandelt)									

Bei Stirnplattenverbindungen wird die äußere Beanspruchung über den Trägerflansch und die Stirnplatte exzentrisch in die Schraube eingeleitet, wie bereits in Bild 8-2 gezeigt. Hierdurch ergibt sich eine zusätzliche Beanspruchung der Schraube, welche bei der Ermüdungsbemessung berücksichtigt werden muss. Zur Ermittlung derartiger Schraubenspannungen dienen Schraubenkraftfunktionen, welche eine Relation zwischen Schraubenkraft und äußerer Zugkraft im Flansch herstellen. Der Verlauf der Schraubenkraft hat durch die sukzessive Öffnung der Schraubenklemmung einen nichtlinearen Charakter. Gängige analytische Modelle zur Beschreibung der Schraubenkraft beziehen sich auf ein L-Modell, lassen sich aber ggf. auf das T-Modell übertragen, sodass sie theoretisch zur Berechnungen von Stirnplatten mit und ohne Überstand angewandt werden können, siehe Bild 8-4.

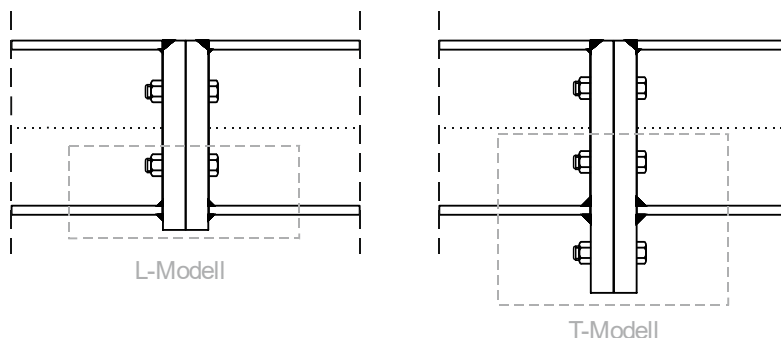


Bild 8-4: Verbindung mit bündiger und überstehender Stirnplatte mit Bezeichnung des L- und T-Modells

Figure 8-4: Connection with flush and overhanging end plate with designation of L and T model

In jeglichen Schraubenkraftmodellen werden als Eingangsparameter die Schraubensteifigkeit C_S und Druckkörpersteifigkeit C_D benötigt, siehe Gleichung (8-1) und (8-2).

$$C_S = \frac{1}{\int_0^{l_s} \frac{1}{EA_S(x)} dx} \quad (8-1)$$

$$C_D = \frac{1}{2 \cdot \int_0^{t_s} \frac{1}{EA_D(x)} dx} \quad (8-2)$$

Wobei E den E-Modul darstellt, $A_S(x)$ die Querschnittsfläche der Schraube und $A_D(x)$ die des Druckkörpers beschreibt und t_s die Dicke einer Stirnplatte darstellt.

Im vereinfachten bi-linearen Modell nach Petersen, siehe Bild 8-5, wird die Schraubenkraft über das Verhältnis der Federsteifigkeiten von Schraube und Druckkörper ermittelt, solange die Verbindung nicht klappt. Im Bereich der Klaffung wird diese für den Grenzfall „Kantenträger“ statisch ermittelt. Bei keiner Vorspannung der Schraube, lässt sich die Schraubenkraft mit dem Hebelgesetz bestimmen, Gleichung (8-8), gepunktete Linie in Bild 8-5. Wird die Schraube mit der Vorspannkraft F_V vorgespannt, besitzt die Schraube diese Vorspannkraft als Zugkraft und der Druckkörper erfährt diese gleichermaßen als Druckkraft. Bei Vorhandensein einer äußeren Zugkraft Z erhöht sich die Zugkraft in der vorgespannten Schraube, während sich die Druckkraft im Druckkörper verringert [126].

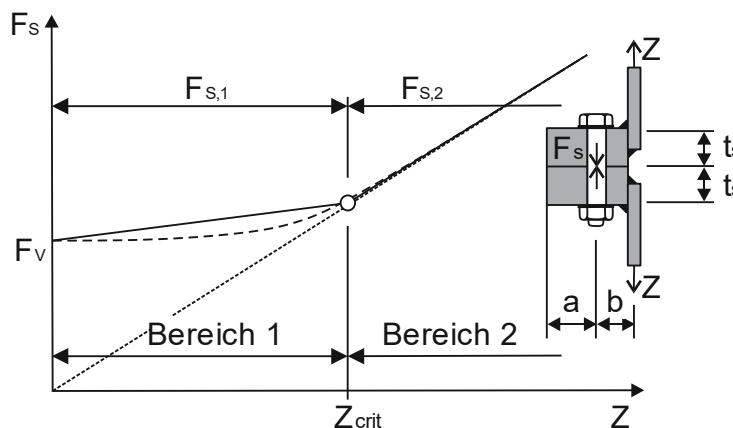


Bild 8-5: Schraubkraftfunktion nach Petersen [126]

Figure 8-5: Bolt load function according to Petersen [126]

Nachfolgend sind die Gleichungen und Hilfwerte zur Bestimmung der Schraubenkraft angegeben.

Federwerte: $p = \frac{C_S}{C_D + C_S} \quad (8-3)$

$$q = \frac{C_D}{C_S + C_D} \quad \left. \vphantom{q} \right\} \text{mit } p + q = 1 \quad (8-4)$$

Hilfwerte: $\lambda = \frac{a+b}{a}$, siehe Bild 8-5 (8-5)

$$Z_{krit} = \frac{F_V}{q \cdot \lambda} \quad (8-6)$$

Schraubenkraft: $F_{S,1} = F_V + p \cdot F = F_V + p \cdot \lambda \cdot Z \quad (8-7)$

$$F_{S,2} = \lambda \cdot Z \quad (8-8)$$

Druckkraft:
$$F_D = F_V - q \cdot F = F_V - q \cdot \lambda \cdot Z \quad (8-9)$$

In Bild 8-5 wird erkenntlich, dass das Modell (durchgezogene Linie) die wahre Schraubenkraft (gestrichelte Linie) im ersten Bereich konservativer Weise überschätzt.

Des Weiteren ist das Modell zur Berechnung der Schraubenkraft von Schmidt und Neuper [127] zu nennen, welches einen trilinearen Ansatz verfolgt. Es ist jedoch durch die Anwendungsgrenze $(a + b)/t_s \leq 3$ beschränkt, was die Übertragbarkeit auf Stirnplattenverbindungen häufig ausschließt. Beide Modelle haben gemein, dass sie die Biegespannung in der Schraube, die laut DIN EN 1993-1-9 [1] berücksichtigt werden muss, vernachlässigen.

Um die Schraubenbiegung zu berücksichtigen, beschreibt Petersen des Weiteren die elasto-statische Theorie des L-Modells, siehe Bild 8-6.

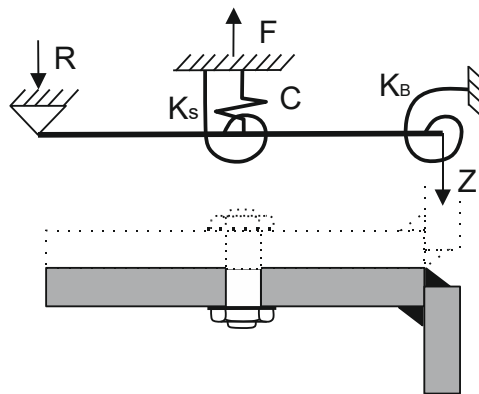


Bild 8-6: Elasto-statische Theorie des L-Modells nach Petersen [126]

Figure 8-6: Elasto-static theory of the L-model according to Petersen [126]

Hier wird die Anbindung des Zugblechs an die Stirnplatte durch eine Drehfeder mit der Konstanten K_B ersetzt. Die Klemmwirkung der Schraube wird durch eine Verschiebungsfeder mit der Konstante C ersetzt, welche eine Parallelschaltung der Steifigkeiten von Schraube C_S (8-1) und Druckkörper C_D (8-2) darstellt. Zusätzlich wird, anders als in den vorher genannten Modellen, die Biegesteifigkeit der Schraube durch die Drehfeder mit der Konstanten K_S berücksichtigt. Durch die äußere Zugkraft Z entsteht die Kraft F , welche eine Erhöhung der Federkraft bewirkt. Die gegenseitige Stützung der Bleche führt am freien Ende zur Entstehung der Randkraft R . Schraubenkraft F_S und Schraubenmoment M_S werden über die relativ umfangreiche statische Berechnung der Durchbiegung ω_s und der Verdrehung φ_s des Systems bestimmt, siehe Gleichungen (8-10) und (8-11).

$$F_S = C \cdot \omega_s \quad (8-10)$$

$$M_S = K_S \cdot \varphi_s \quad (8-11)$$

Das elastostatische Stabmodell des L-Stoßes nach Petersen ist auf einen T-Stoß übertragbar. Für den Fall des T-Stoßes wird $K_B = \infty$ angenommen und die äußere Zugkraft wird aufgrund des Vorhandenseins von zwei Schrauben anstelle einer Schraube halbiert.

Weitere, genauere aber auch komplexere Modelle zur Berechnung der Schraubenkraft einer Stirnplattenverbindung, wie der Polynomansatz nach Petersen [128] oder das Vorgehen nach VDI-Richtlinie 2230 [129] werden hier nicht näher erläutert. Alternativ kann die Schraubenspannung über numerische Simulationen bestimmt werden.

8.2.3 Bisherige Untersuchungen zur Ermüdung von Stößen mit vorgespannten Schrauben

Previous investigations on the fatigue of joints with prestressed bolts

Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von T- bzw. L-Stößen mit vorgespannten Schrauben spielen nicht nur bei Stirnplattenstößen von Kranbahnträgern sondern auch bei Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen (WEA) eine große Rolle. Aus diesem Grund stehen bei vielen Untersuchungen von L-Flanschen Abmessungsverhältnisse und Schweißnahtgeometrien im Fokus, die bei Windenergieanlagen eingesetzt werden. Diese Forschungsansätze lassen sich nur eingeschränkt auf T- und L-Stöße in Stirnplattenverbindungen übertragen.

Bei vielen Untersuchungen an T- und L-Stößen mit Schraubenverbindungen lag der Fokus auf der Studie des nichtlinearen Schraubenkraftverlaufes bei äußerer Belastung der Stöße. Die Ermüdungssicherheit der Schweißnaht wurde in den meisten Fällen nicht analysiert. Die wichtigsten Beiträge werden im Folgenden kurz erläutert.

Lacher führte eine Studie zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von T-Verbindungen im Kontext der Kopfplattenverbindung durch [130]. Dabei untersuchte er den Einfluss von Imperfektionen der Kopfplatte auf die Schraubenbeanspruchung in Abhängigkeit der Plattengeometrie. Imperfektionen beeinflussen die Kontaktzone der Stirnplatten maßgeblich, was sich wesentlich auf die Schraubenbeanspruchung auswirkt. Dabei kann sich ein belassener Schweißverzug des T-Stoßes positiv auf die Kontaktzone und somit auf die Schraubenbeanspruchung auswirken. Lacher und Hedenkamp führten außerdem Versuche an Stirnplattenverbindungen von Walzträgern durch [131, 132]. Sie stellen fest, dass der kleinskalige T-Stoß im Vergleich zum Bauteilversuch in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit auf der unsicheren Seite liegt. Aus diesem Grund wird ein Erhöhungsfaktor für die einwirkenden Spannungen beim Stirnplattenstoß wegen Symmetrieschwankungen empfohlen. Ein vorgeschlagenes Bemessungskonzept basiert auf der Begrenzung äußerer Lasten durch die Schraubenvorspannkraft und einem Bemessungsfaktor, der von der Lastspielzahl abhängt [131]. In allen Untersuchungen wurde die Ermüdung der Schweißnaht zur Verbindung von Stirnplatte und Zugblech bzw. Flansch nicht betrachtet. Lehmann [133, 134, 135] entwickelte ein nichtlineares Berechnungsverfahren für die Schraubenkraft eines vorgespannten L-Stoßes unter Zugbelastung auf der Basis von Stabsystemen. Die Berechnung des nichtlinearen Verlaufs erfolgt dabei u. A. mittels FEM. Für dicke Platten wird ein Näherungsverfahren abgeleitet. Die Ansätze von Schmidt/Neuper und Petersen sowie der VDI 2230 (vgl. Abschnitt 8.2.2) werden dabei kritisch bewertet. Der Kontext bezieht sich jedoch auf Stöße in Türmen von Windenergieanlagen und die Ermüdung der Schweißnaht steht erneut nicht im Fokus.

Auch Seidel und Schaumann befassten sich mit der Ermüdungsbeanspruchung von vorgespannten Schrauben in turmartigen Konstruktionen [136, 137]. Hier wird ein Bemessungsverfahren mittels Tabellenkalkulation vorgestellt, wobei sowohl Normal- als auch Biegebeanspruchung der Schraube berücksichtigt werden. Außerdem wurden die Güten verschiedener FEM Modellierungsmethoden auf die Simulationsergebnisse von Schraubenverbindungen im WEA Kontext betrachtet. Hier wiesen auch simpel modellierte Schrauben gute Übereinstimmungen auf [138].

Um das Ermüdungsverhalten von Stirnplattenverbindungen auch in Verbindung mit der Ermüdung der Schweißnaht zu analysieren, wurden von Schaumann und Schwarzer weitergehende Studien durchgeführt [139]. Sie untersuchten das Ermüdungsverhalten einer HY-Naht am kleinskaligen T-Stoß einer Stirnplattenverbindung anhand von Versuchen und unterstützenden numerischen Simulationen zur Anwendung des Kerbspannungskonzeptes. Das Versagen trat hierbei immer am Nahtübergang zur Stirnplatte auf. Die nicht-durchgeschweißte Naht schien keinen ermüdungsfestigkeitsmindernden Einfluss zu haben. Für das Versagen am Schweißnahtübergang zur Platte ergibt sich Kerbfall 80 und für den Wurzelriss wird Kerbfall 50 vorgeschlagen [139].

Ladinek et al. [140] führten Ermüdungsversuche an bündigen Stirnplattenverbindungen mit durchgeschweißten HV-Nähten und vorgespannten Schrauben durch. Während in diesen Versuchen die Schraube stets das ermüdungsanfälligste Detail darstellte, konnte die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht mittels Kerbspannungskonzept bewertet werden [140].

8.3 Probekörper und Versuchsvorbereitung

Specimens and test preparation

Um das Ermüdungsverhalten von Stirnplattenverbindungen näher zu untersuchen, werden Versuche an Groß- und Kleinprobekörpern durchgeführt, siehe Bild 8-7. Dabei wurden zwei Arten von Stirnplatten, am Unterflansch bündig und überstehend, untersucht. Die Oberseite der Verbindung ist in allen Fällen bündig gestaltet, da im Anwendungsfall eines Kranbahnträgers die Kranschiene auf dem Oberflansch aufliegt. Des Weiteren wurden sowohl Kehlnaht- als auch Stumpfnahntverbindungen zwischen unterem Zugflansch und Stirnplatte untersucht, wie Bild 8-7 zu entnehmen ist.

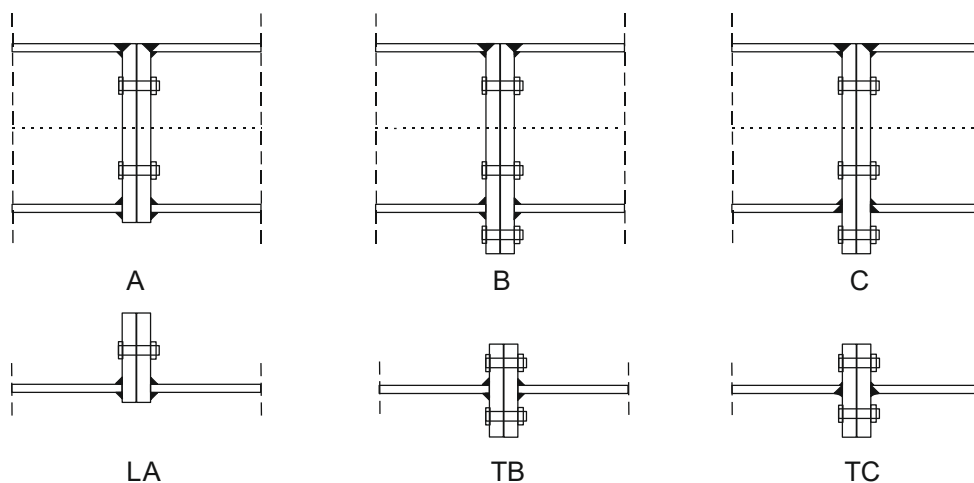


Bild 8-7: Großprobekörper A, B und C, sowie Kleinprobekörper LA, TB und TC

Figure 8-7: Large specimens A, B and C, as well as small specimens LA, TB and TC

Die Großversuche bestehen aus HEA-Walzprofilen, 30 mm dicken Stirnplatten und vorgespannten M24 Schrauben der Güte 10.9. Die Kleinprobekörper stellen Ausschnitte der Großprobekörper im Zugbereich dar und wurden analog aus Blechen gefertigt. Die Abmessungen der Stirnplattenverbindungen wurden in Anlehnung an typisierte Verbindungen [124] gewählt und sind den Abbildungen Bild 25-1 bis Bild 25-6 im Anhang zu entnehmen. In drei Serien LA, TB und TC wurden je sechs Probekörper unter Zug getestet. Als Referenz wurden je zwei Bauteilversuche der Serien A, B und C unter Biegebelastung durchgeführt.

Die Kleinprobekörper wurden aus gewalzten Blechen S355J2+N gefertigt, die von der AG der Dillinger Hüttenwerke zur Verfügung gestellt wurden. Mechanische Eigenschaften der Bleche können Tabelle 25-1 entnommen werden. Wie dort ebenfalls zu entnehmen ist, erfüllen die Bleche die Forderung der einschlägigen Liefernorm DIN EN 10025-2 [141]. Die chemische Zusammensetzung der Bleche ist in Tabelle 25-2 angegeben.

Die Großprobekörper wurden ebenfalls aus den oben aufgeführten Blechen sowie aus HEA240-Trägern aus S355J2-AR gefertigt, die von der Peiner Träger GmbH bereitgestellt wurden. Die Träger erfüllen ebenfalls die Voraussetzungen der einschlägigen Norm DIN EN 10025-2 [141], siehe Tabelle 25-3. Deren chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 25-4 angegeben.

Die verwendeten hochfesten M24 Schrauben der Probekörper wurden von der August Friedberg GmbH zur Verfügung gestellt. Die mechanischen Eigenschaften der Schrauben sind Tabelle 25-5 zu entnehmen. Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 25-6 aufgeführt. Die Schrauben erfüllen die Voraussetzungen der einschlägigen Normen DIN EN 14399-4 [142], DIN EN ISO 898-1 [143] und DIN EN ISO 10684 [144].

Die HV-Schrauben der Größe M24 wurden im Kaltumform-Prozess gefertigt. Vor dem Vergüten der Schrauben wurde das Gewinde gerollt bzw. gewalzt. Nach der Vergütung folgte die Feuerverzinkung in Anlehnung an die DAST-Richtlinie 021 [145] mit Zinkbadparametern nach DAST-Richtlinie 022 [146]. Bei der Fertigung der Muttern wurden zunächst Mutterrohlinge warm umgeformt. Anschließend wurden diese vergütet und danach feuerverzinkt. Das Muttergewinde wurde nach der Feuerverzinkung mit einem Gewindebohrer erstellt. Schließlich erfolgte dann die Schmierung der Mutter. Die Unterlegscheiben wurden aus Blechen gestanzt, vergütet und im letzten Schritt feuerverzinkt.

Die Fertigung der Probekörper wurde von der FREYLER Industriebau GmbH durchgeführt. Informationen zum Schweißprozess sind Tabelle 25-7 und Tabelle 25-8 zu entnehmen.

Die Abmessung der Probekörper und die Schweißnahtgeometrie haben einen großen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Aus diesem Grund wurden alle Probekörper vor der Versuchsdurchführung sorgfältig vermessen, um mögliche Abweichungen von den geforderten Probekörpermaßen festzustellen. Zum Vermessen der Schweißnähte diente eine Schweißnahtlehre. Außerdem wurden die Probekörper optisch auf Schweißnahtfehler untersucht. Auch die verwendeten Schrauben wurden vermessen und Auffälligkeiten wurden dokumentiert. Außerdem wurden die Abweichungen der charakteristischen (ch) zu den nominellen Werten (nom) bestimmt. Es sind Abweichungen von bis zu 13 % bezüglich der Flansch- und Stegdicke erkennbar. Die charakteristischen Werte sind diesbezüglich immer größer. Auch die Höhe des charakteristischen Schraubenkopfes ist ca. 12 % größer. Weitere Differenzen sind in den Schweißnahtdicken ersichtlich: Die Schweißnahtdicken des Steges und des Flansches im Druckbereich sind größer als die geplanten 3 mm. Für die Schweißnahtdicke des Flansches im Zugbereich der Verbindung liegen für alle Probekörper ebenfalls höhere Werte vor. Die genauen Abmessungen der Schweißnahtdetails im Zugbereich sind in Tabelle 25-9 aufgelistet. Während die charakteristischen Schweißnahtdicken der Doppelkehlnähte der Probekörper A, B, LA und TB bis zu 15,4 % größer sind weicht die Schweißnahtgeometrie für Probekörper C und TC stärker ab. Die Mindestschweißnahthöhe der HV-Naht von 4 mm wird im Durchschnitt mit Nahthöhen von 8,5 mm deutlich überschritten. Zur Nachrechnung der Versuche mittels numerischer Berechnungen müssen diese Abweichung der geometrischen Größen berücksichtigt werden. Es werden die realen, charakteristischen Querschnitts- und Schweißnahtwerte modelliert.

8.4 Versuchsstände

Test set-ups

Zur Durchführung von Ermüdungsversuchen an den Großproben wurde im Zuge des Forschungsvorhabens an der RWTH Aachen ein neuer Resonanzversuchsstand für eine wirtschaftliche Durchführung an Großbauteilen entwickelt, siehe Bild 8-8.



Bild 8-8: Versuchsstand für Großprobekörper mit eingebautem Probekörper B

Figure 8-8: Test set-up for large-scale specimens with incorporated specimen B

Die Probekörper werden dabei durch Unwuchtmotoren zum Schwingen angeregt. Zwei miteinander über die Stirnplattenverbindung verschraubte Probekörperhälften ergeben einen Träger. Dieser wird mit zwei gelenkigen Lagern befestigt, wobei sich als statisches System ein Einfeldträger mit zwei Kragarmen ergibt, siehe Bild 8-9 (links). Dabei bewirken zwei zueinander gegenläufige Motoren an den Trägerenden eine Biegebelastung der Stirnplattenverbindung in der Feldmitte, wie durch die gestrichelten Linien dargestellt.

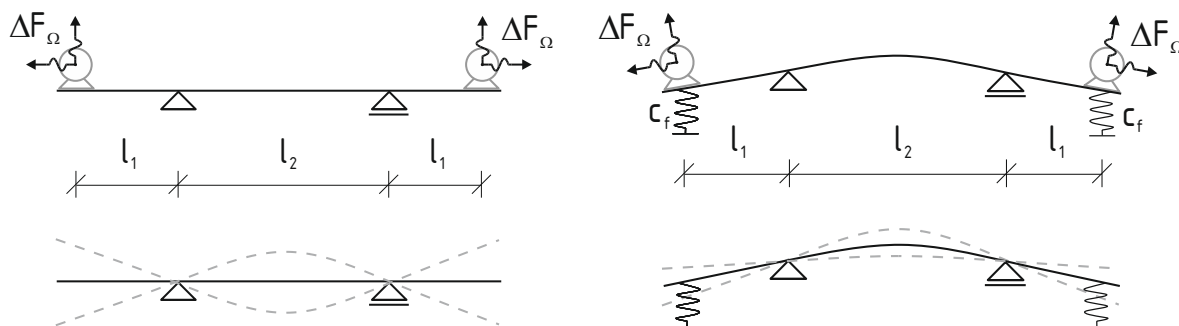


Bild 8-9: Statisches System und Biegelinien des Versuchsstandes ohne Vorspannung (links) und mit Vorspannung (rechts)

Figure 8-9: Static system and bending lines of the set-up without preload (left) and with preload (right)

Hierbei ergibt sich eine reine Wechselbeanspruchung ($R = -1$), vgl. Abschnitt 2.2. Aufgrund des Mittelspannungseinflusses ist es allerdings zweckmäßig, Ermüdungsversuche im Zugschwellbereich (z. B. $R = 0,1$) durchzuführen, wie im Rahmen dieses Projektes ebenfalls ausgeführt. Hierzu wird der Probekörper an den Enden durch eine Federkonstruktion vorgespannt, bevor die Unwuchtmotoren gestartet werden, siehe Bild 8-9 (rechts). Die Gewichte der Unwuchtmotoren können stufenlos verstellt werden, sodass die Größe der Unwucht gesteuert werden kann, siehe Bild 8-10 (links). Zusätzlich ist die Größe der Unwucht von der Erregerfrequenz des Motors abhängig, siehe Gleichung (8-12).

$$F_0 = m_0 \cdot r \cdot \Omega^2 \quad (8-12)$$

Experimentelle Untersuchungen zum Stirnplattenstoß mit vorgespannten Schrauben

Dabei stellt F_0 die Zentrifugalkraft und m_0 die Masse des Unwuchterregers dar. Der Radius r misst den Abstand vom Massenschwerpunkt der Unwuchten zum Mittelpunkt der Rotationsachse des Motors. Die Winkelgeschwindigkeit der Rotation Ω ergibt sich durch die Multiplikation der Prüffrequenz f mit 2π . Die Intensität der Schwingung hängt ebenfalls vom Verhältnis der Erregungsfrequenz und der Eigenfrequenz des Systems ab. Die Resonanzeffekte, welche die Amplitude vergrößern sind umso größer, je näher die beiden Frequenzen beieinander liegen.

Auch die Größe der Vorspannung ist steuerbar. Mithilfe einer Spannschlossmutter kann die Vorspannkonstruktion so weit angezogen werden, bis die erforderliche Vorspannung, welche von einer Kraftmessdose aufgezeichnet wird, erreicht ist, siehe Bild 8-10 (rechts).

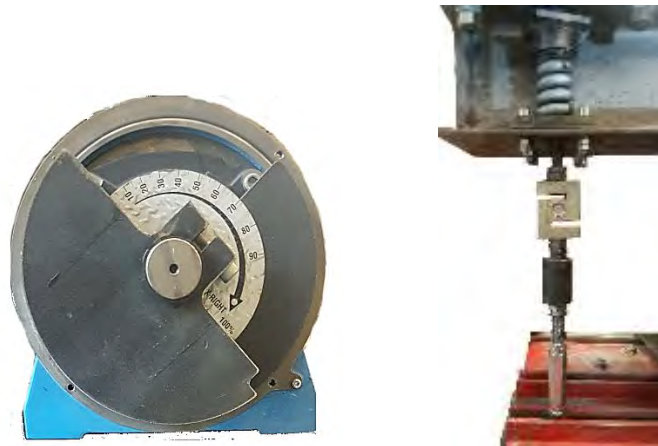


Bild 8-10: Unwuchtmotor (links) und Vorspanneinrichtung am Trägerende (rechts)

Figure 8-10: Imbalance motor (left) and pretensioning device at beam end (right)

Der Vorteil des neuen Versuchsstands ergibt sich durch die hohe Prüffrequenz: Die Motoren können eine Frequenz von bis zu 25 Hz erreichen. Ferner wird für dieses System kein Spannfeld und kein Hydraulikzylinder benötigt. Somit ist es unabhängig von den üblichen Prüfständen der Forschungseinrichtung.

Jedoch ist zu beachten, dass durch die Unwuchtmotoren eine enorme Schwingung und Lärmbelastung erzeugt wird. Weiterhin reagiert der Prüfstand sehr sensibel auf geringe Veränderungen der Vorspannung, sowie zusätzlicher Masse bzw. Dämpfung. Einige Elemente des Versuchsstands, wie Gewindestangen und Schrauben müssen aufgrund ihrer Ermüdungsbelastung regelmäßig ersetzt werden, wodurch ein erheblicher Zusatzaufwand bei der Versuchsdurchführung entsteht. Aus diesen Gründen wurden parallel zur Versuchsdurchführung an dem Resonanzprüfstand Versuche auf konventionelle Weise in einem 4-Punkt-Biege-Versuchsstand im Spannfeld unter Verwendung eines Hydraulikzylinders mit einer Frequenz von 0,5 Hz bis 1,6 Hz durchgeführt, siehe Bild 8-11.



Bild 8-11: Versuchsstand im Spannfeld

Figure 8-11: Test set-up on rigid floor

Die Durchführung der Kleinprobekörperversuche erfolgte in einer Vier-Säulen-Prüfmaschine mit einer maximalen dynamischen Belastbarkeit von 480 kN unter reinen Zugbeanspruchung, siehe Bild 8-12. Hierbei konnten Frequenzen von 12 Hz bis 14 Hz realisiert werden.



Bild 8-12: 4-Säulen-Prüfmaschine für Kleinprobekörper mit eingebautem Probekörper TC

Figure 8-12: 4-column testing machine for small-scale specimens with incorporated specimen TC

8.5 Messtechnik und Versuchsdurchführung

Measurement instrumentation and testing

Um die Versuchsdurchführung bestmöglich zu kontrollieren und neben globalen auch lokale Messgrößen aufnehmen zu können, wurden alle Großprobekörper mit Kraftmessdosen, Wegaufnehmern und Dehnungsmessstreifen (DMS) versehen. Die Kleinprobekörper

wurden ebenfalls mit Dehnungsmessstreifen bestückt. Auch für die numerische Nachrechnung der Versuche sind diese Kontrollgrößen erforderlich. Bild 8-13 und Bild 8-14 zeigen Skizzen der Klein- und Großprobekörper mit Position der Messtechnik. Beispielfähig sind hier nur B-, und TB- bzw. C- und TC-Probekörper dargestellt, die Zeichnungen beziehen sich jedoch auch gleichermaßen auf die A- und LA-Probekörper.

Um an ausgewählten Schrauben die Schraubenkraft während des Versuchs aufzeichnen zu können, wurden einige Schrauben mit DMS bestückt. Die Schrauben-DMS werden in ein sich in der Mitte der Schraube befindliches, 2 mm dickes Bohrloch eingebracht und liegen im Schraubenschaft. Somit können sie die Dehnung der Schraube in Schraubennachse messen, nicht aber die Biegespannungen an der Randfaser des Schraubenschafts. Theoretisch kann die Schraubenkraft über die gemessene Dehnung per Hookeschem Gesetz analytisch berechnet werden. Zur Überprüfung des Faktors $\frac{\text{Kraft}}{\text{Dehnung}} = \frac{F}{\varepsilon}$ wurde jede einzelne Messschraube mit Hilfe einer 100 kN Prüfmaschine kalibriert. Die F/ε -Verläufe sind im Anhang in Bild 25-7 in Abhängigkeit der Zugkraft dargestellt. Zunächst fällt hierbei eine nicht unwesentliche Streuung in den F/ε -Verläufen auf. Dies ist auf die schwierige Applikation der DMS im schmalen Bohrloch zurückzuführen. Außerdem lässt sich ein nichtlineares Verhalten erkennen, welches sich jedoch mit zunehmender Kraft einem fixen Wert annähert. Da die Schrauben im Versuch mindestens auf eine Kraft von 220 kN vorgespannt werden, ist anzunehmen, dass sich der F/ε -Faktor im Versuch konstant verhält. Um die Vorspannkraft jeder einzelnen Messschraube aus der aufgezeichneten Dehnung zu ermitteln, wird der jeweilige für diese Schraube gültige im Kalibrierungsversuch ermittelte F/ε -Faktor bei 100 kN Zugkraft verwendet.

Auf den Großprobekörpern wurden zwei Dehnungsmessstreifen, DMS1 und DMS2, an der Zugseite des Walzträgers in Längsrichtung angebracht, um die Biegespannung längs des Trägers kontrollieren zu können. Der DMS 3 misst die Dehnung der Stirnplatte auf Höhe der Schrauben. Bei allen A-Probekörpern wurde DMS 4a appliziert, um zusätzlich zu DMS 3 die Dehnung in der Stirnplatte im weniger belasteten Außenbereich zu messen. Bei allen B- und C-Probekörpern wurde stattdessen DMS 4b angebracht, der die Dehnung der Stirnplatte auf Höhe der Schrauben im Überstand aufzeichnen soll. Im Zugbereich der A-Probekörper wurde je eine Messschraube DMS 5s verwendet. Bei jeweils einem der B- und C-Probekörper wurden zwei Messschrauben DMS 5s und DMS 6s angebracht. Der jeweils zweite B- und C-Probekörper enthielt nur eine Messschraube DMS 5s. Auf Höhe der Stirnplattenverbindung wurde bei den Großprobekörpern ein Wegaufnehmer angebracht, um die Durchbiegung an dieser Stelle messen zu können. An den Trägerenden wurden im Falle der Versuchsdurchführung im Resonanzprüfstand Kraftmessdosen eingesetzt, welche die Trägervorspannung aufzeichneten. Im Fall der Versuchsdurchführung im Vier-Punkt-Biegeversuchsstand wurde die Kraft des Hydraulikzylinders aufgezeichnet.

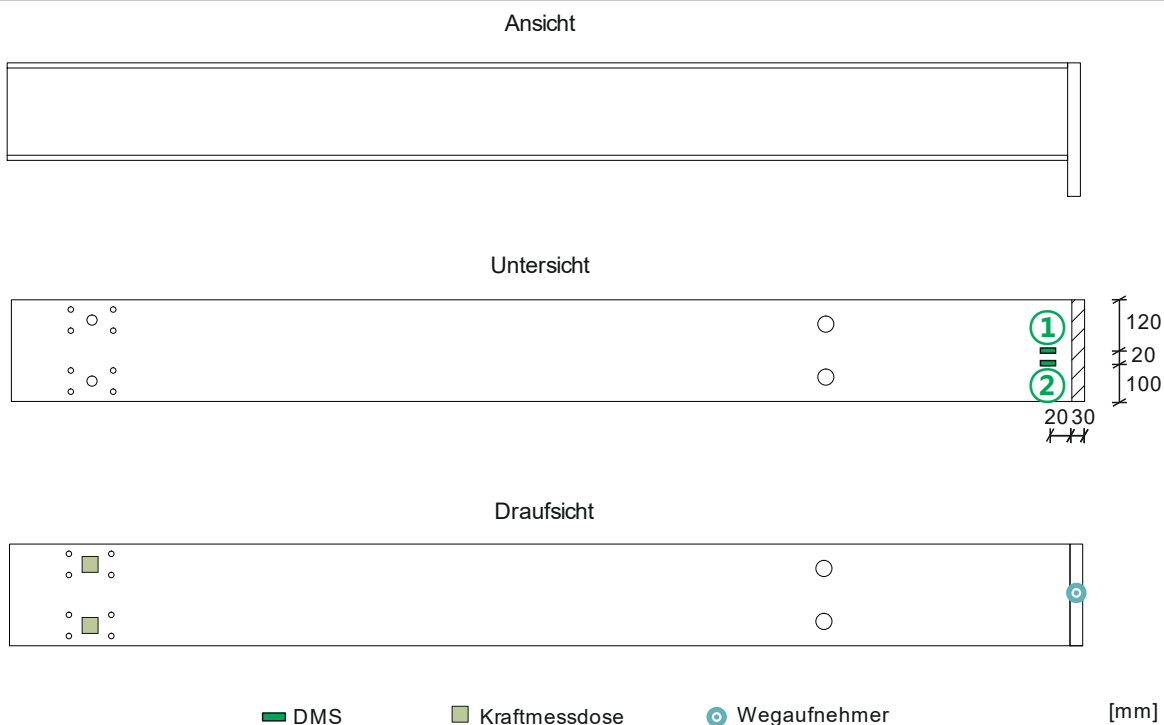


Bild 8-13: DMS der Großprobekörper in Ansicht und Draufsicht

Figure 8-13: DMS of large-scale specimens in view and top view

Bei den Kleinprobekörpern wurde pro Versuch eine Messschraube DMS 1S eingesetzt. Um die Dehnung der Stirnplatte zu messen, kam je Probekörper ein DMS2 zum Einsatz. Die Dehnung im Zugblech wurde von DMS3 aufgezeichnet.

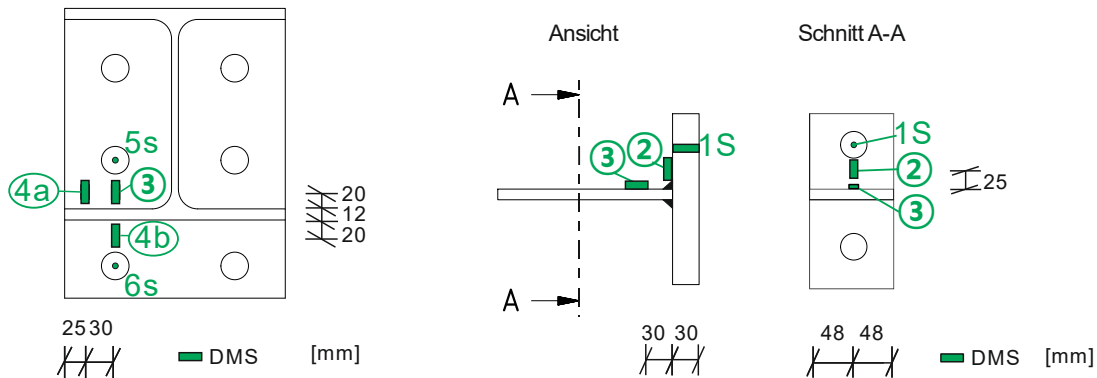


Bild 8-14: DMS der Großprobekörper im Querschnitt (links) und DMS der Kleinprobekörper (rechts)

Figure 8-14: DMS of large-scale specimens in cross-section (left) and DMS of small-scale specimens (right)

Zur Vorspannung der Schrauben aller Probekörper wurde die Regelvorspannkraft mittels Drehmomentenverfahren aufgebracht. Die Vorspannung wurde anhand der Messschrauben kontrolliert. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei gleichen Einstellungen des Drehmomentenschraubers je nach Schraube und Probekörper unterschiedliche Vorspannkraften in die Messschrauben eingebracht wurden.

Die verschiedenen Prüfkörper wurden mit unterschiedlichen Spannungsschwingbreiten im Zeitfestigkeitsbereich mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ kraft- bzw. spannungsgesteuert belastet. Bei der Versuchsdurchführung wurden die Prüfkörper in regelmäßigen Abständen auf Anrisse untersucht.

8.6 Versuchsergebnisse

Test results

Die Großprobekörper wurden auf Biegung belastet, wobei vor dem Start der Belastung die Mittelspannung aufgebracht wurde. Sobald der Probekörper durch vorangeschrittene Rissausbreitung und Bruch einzelner Querschnittsteile (i.d.R. Zugflansch und Steg) nicht mehr in der Lage war, die Mittelspannung aufzunehmen, galt der Versuch als beendet und das Versagenskriterium als erreicht. Tabelle 8-2 zeigt die Versuchsergebnisse aller drei Serien der Großprobekörper. Dabei wurde das Spannungsverhältnis R auf Basis der Spannung am Schweißnahtübergang bzw. an der Schweißnahtwurzel berechnet. Die Vorspannkraft der Schrauben $V_{Schraube}$ wurde mithilfe der kalibrierten F/ε -Umrechnungsfaktoren der Schrauben-DMS bestimmt, siehe Bild 25-7. Die Spannungsschwingbreiten am Schweißnahtübergang $\Delta\sigma_{\ddot{u}}$ bzw. an der Schweißnahtwurzel $\Delta\sigma_W$ wurden berechnet, diejenige in Schraubenmitte $\Delta\sigma_{SM}$ gemessen.

Tabelle 8-2: Versuchsergebnisse der Großprobekörper

Table 8-2: Test results of large-scale specimens

Probe	R	$V_{Schraube}$	$\Delta\sigma_{\ddot{u}}$	$\Delta\sigma_W$	$\Delta\sigma_{SM}$	Versagensort	Zyklen	Zyklen
	-	kN	MPa	MPa	MPa	-	Schraube	Schweißnaht
A1	0,1	228	125	115	230	Schraube / Schweißnahtwurzel	21.114	250.089
A2	0,1	291	115	106	147	Schraube / Schweißnahtwurzel	63.877	308.037
B1	0,1	211	163	150	39	Schweißnahtwurzel	-	165.901
B2	0,1	180	136	125	42	Schraube / Schweißnahtwurzel	196.717	2.380.886
C1	0,1	265	160	-	80	Schraube / Schweißnahtübergang	169.816	296.020
C2	0,1	253	145	-	51	Schweißnahtübergang	-	445.281

Bild 25-11 bis Bild 25-15 und Bild 8-15 zeigen die Bruchbilder der Großprobekörper.

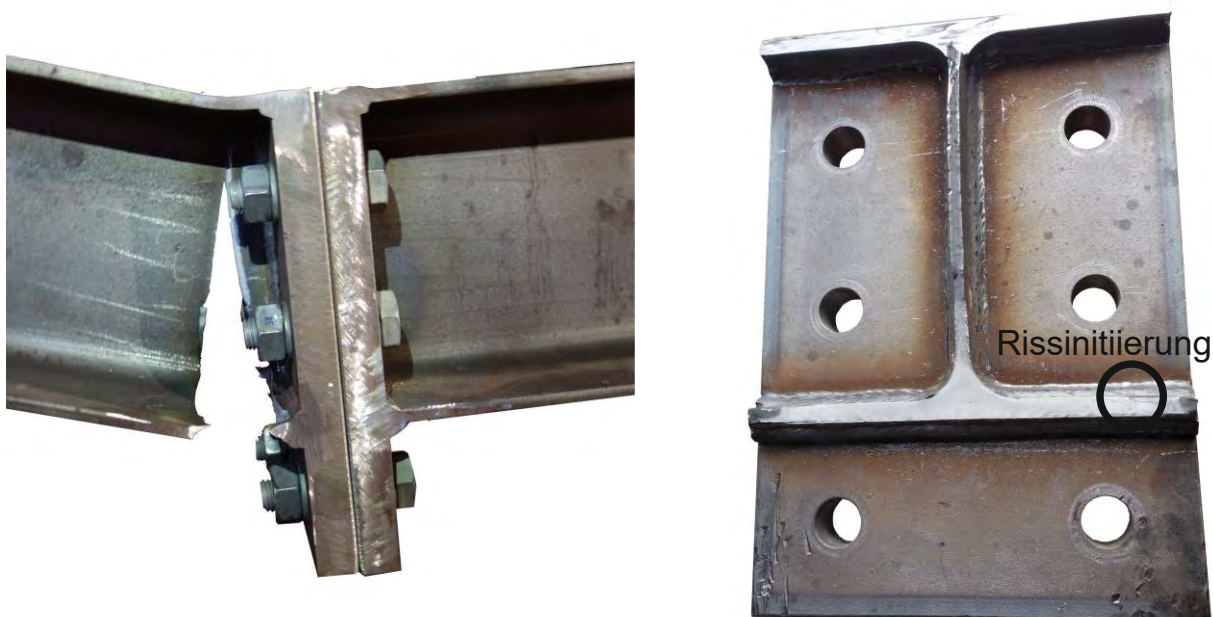


Bild 8-15: Versagen des Probekörpers C1

Figure 8-15: Failure of the specimen C1

Experimentelle Untersuchungen zum Stirnplattenstoß mit vorgespannten Schrauben

Bei beiden Prüfkörpern der Serie A und je einem Probekörper der Serie B und C versagte als erstes eine Schraube im Zugbereich. Nachfolgend wurde diese Schraube ausgetauscht und der Versuch wurde fortgeführt. Die Schrauben wurden sooft ausgetauscht, bis ein Versagen durch Rissinitiierung und -wachstum an der Stirnplattenverbindung eintrat.

Bei allen Probekörpern der Serien A und B, deren Stirnplattenstoß in allen Fällen mit Kehlnähten ausgeführt wurde, begann die Rissbildung an der Schweißnahtwurzel. Das Risswachstum erfolgte in allen Fällen durch die Schweißnaht bis hin zum Schweißnahtübergang. In einigen Fällen konnte eine nachfolgende Rissbildung auch am Schweißnahtübergang festgestellt werden. Beim Probekörper A1 kam es durch eine einseitige Rissbildung im Flansch zur Querbiegung in der Kopfplatte, was zum Rissfortschritt und Bruch der Kopfplatte führte. Bei beiden Prüfkörpern der Serie C kam es durch die Stumpfnah an der Kopfplattenverbindung ausschließlich am Schweißnahtübergang zur Rissinitiierung und zum Rissfortschritt.

Die Kleinprüfkörper wurden auf Zug beansprucht. Als Versagenkriterium wurde der vollständige Bruch der Proben festgelegt. Tabelle 8-3 zeigt die Versuchsergebnisse aller drei Serien der Kleinprobekörper.

Tabelle 8-3: Versuchsergebnisse der Kleinprobekörper

Table 8-3: Test results of small-scale specimens

Probe	F_{min}	F_{max}	R	$V_{Schraube}$	$\Delta\sigma_{\dot{U}}$	$\Delta\sigma_W$	$\Delta\sigma_{SM}$	Versagensort	Zyklen
	kN	kN	-	kN	MPa	MPa	MPa		
LA1	9,5	95,0	0,1	253	74	90	206,0	Schraube	40.754
LA2	16,4	82,9	0,2	278	58	70	69,0	Schraube	346.518
LA3	6,9	68,6	0,1	277	54	65	52,0	Schweißnahtwurzel	1.657.549
LA4	8,4	84,4	0,1	325	66	80	139,0	Schraube	114.226
LA5	9,0	89,7	0,1	276	70	85	94,0	Schraube	209.803
LA6	9,5	95,0	0,1	274	74	90	100,0	Schraube	109.627
TB1	14,8	148,2	0,1	224	116	100	14,8	Schweißnahtwurzel	860.901
TB2	19,3	192,6	0,1	230	150	130	35,9	Schweißnahtwurzel	233.776
TB3	18,5	185,2	0,1	239	145	125	56,0	Schweißnahtwurzel	420.968
TB4	17,8	177,8	0,1	245	139	120	26,9	Schweißnahtwurzel	435.788
TB5	17,0	170,4	0,1	239	133	115	22,1	Schweißnahtwurzel	506.431
TB6	16,3	163,0	0,1	258	127	110	15,1	Schweißnahtwurzel	477.878
TC1	23,0	230,0	0,1	231	180	-	40,1	Schweißnahtübergang	255.563
TC2	20,5	205,0	0,1	278	160	-	22,9	Schweißnahtübergang	452.763
TC3	19,2	192,0	0,1	232	150	-	17,5	Schweißnahtübergang	711.838
TC4	21,8	217,6	0,1	243	170	-	23,3	Schweißnahtübergang	435.430
TC5	19,8	198,4	0,1	231	155	-	23,9	Schweißnahtübergang	546.198
TC6	18,6	185,6	0,1	216	145	-	1,9	Schweißnahtübergang	1.133.520

Dabei wurden die minimale Zugkraft F_{min} , sowie die maximale Zugkraft F_{max} , die auf das Zugblech aufgebracht wurden, notiert. Das Spannungsverhältnis R wurde auf Basis der Spannung am Schweißnahtübergang bzw. an der Schweißnahtwurzel berechnet. Die Vorspannkraft der Schrauben $V_{Schraube}$ wurde mithilfe der kalibrierten F/ε -Umrechnungsfaktoren der Schrauben-DMS bestimmt, siehe Bild 25-7.

Die Spannungsschwingbreiten am Schweißnahtübergang $\Delta\sigma_{\bar{U}}$ bzw. an der Schweißnahtwurzel $\Delta\sigma_W$ wurden berechnet, diejenige in Schraubenmitte $\Delta\sigma_{SM}$ gemessen.

Die Prüfkörper der Serie LA erfuhren aufgrund der einseitigen Schraubenverbindung eine große Biegebeanspruchung der Stirnplatte sowie der Schraube. In fünf der sechs Versuche hat die Schraube zuerst versagt. Der Versagensort lag dabei in einem Gewindegang, der sich innerhalb der Mutter oder kurz vor der Mutter im belasteten Bereich der Schraube befand. Nur in einem Fall (LA3) lag der Versagensort in der Schweißnahtwurzel.



Bild 8-16: Typische Versagensbilder der Serie LA: Schraube (links) und Schweißnahtwurzel (rechts)

Figure 8-16: Typical failure patterns of series LA: Bolt (left) and weld root (right)

Nachdem im ersten Versuch der Serie die Schraube versagt hat, wurde die Vorspannkraft bei den nachfolgenden Versuchen erhöht, um zu überprüfen ob ein Versagen der Schweißnaht maßgebend wird. Abgesehen vom Versuch LA3 hat in den übrigen Versuchen trotz höherer Vorspannkraft bei den gegebenen Spannungsschwingbreiten auf die Schweißnahtwurzel immer die Schraube versagt. Hierzu ist jedoch zu erwähnen, dass die Spannungsschwingbreite der Schraube mit zunehmender Schwingbreite auf die Schweißnahtwurzel bzw. den Schweißnahtübergang nichtlinear zunimmt. Aus diesem Grund könnte ein Versagen im geringeren Spannungsschwingbreitenbereich durchaus zuerst in der Schweißnahtwurzel auftreten. Um zu untersuchen, ob bei den Probekörpern, bei denen die Schraube versagt hat, im späteren Verlauf ein Schweißnahtversagen auftritt wurden zwei dieser Probekörper (LA5 und LA6) mit neuen Schrauben weiter getestet. Dabei wurden die Schrauben sofort ausgetauscht, bis ein Versagen an der Verbindung eintrat. In beiden Fällen trat ein Versagen jedoch am Bohrloch in der Stirnplatte auf, sodass ein Schweißnahtversagen nicht festgestellt werden konnte.

Vor der Durchführung der Ermüdungsversuche wurden die Kleinprobekörper statisch bis zu einer Zugkraft von 80 kN belastet, um den Schraubenkraftverlauf zu untersuchen. Zudem wurden vergleichsweise auch geringere Vorspannniveaus der Schrauben im statischen Versuch untersucht, wie beispielhaft in Bild 8-17 für den Probekörper LA1 dargestellt. Dabei wird das typische nichtlineare Verhalten der Schraubenkraft über die äußere Zugkraft, die am Zugblech aufgebracht wird, deutlich, vergleiche Abschnitt 8.2.2. Diese Messwerte bestätigen, dass die auf die Schraube resultierende Spannungsschwingbreite umso größer ist, je kleiner die Vorspannung ist.

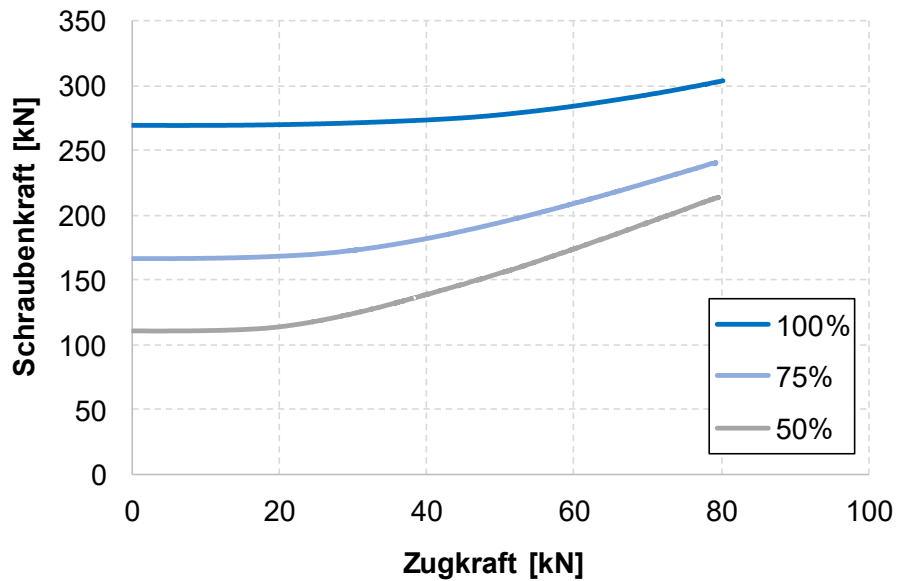


Bild 8-17: Schraubkraftverläufe und DMS Verläufe des Probekörpers LA1 in Abhängigkeit des planmäßigen Schraubenvorspannungsgrad

Figure 8-17: Bolt force and strain gauge curves of specimen LA1 depending on planned bolt prestressing degree

Bei den Probekörpern der Serie T-B trat das Versagen ausschließlich an der Schweißnahtwurzel auf. Zunächst entsteht ein von außen nicht detektierbarer Riss an der Schweißnahtwurzel, wodurch die Wegdifferenz bei gleichbleibender Spannungsamplitude zunimmt, bevor der Probekörper schließlich bricht. Wie auch bei den Großprobekörpern beobachtet, wächst der Riss in einigen Fällen von der Wurzel durch die Schweißnaht bis zum Übergang. Bild 8-18 zeigt zwei Versagensbilder.

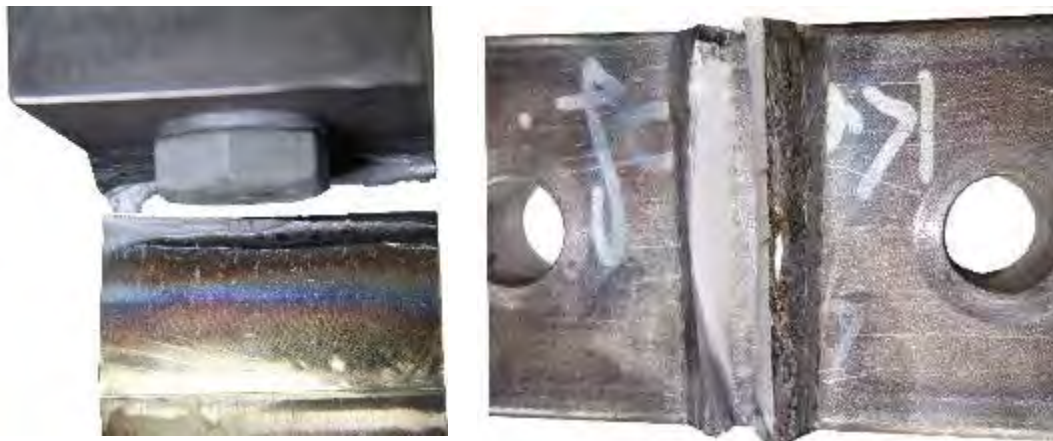


Bild 8-18: Typische Versagensbilder der Serie TB

Figure 8-18: Typical failure patterns of series TB

Die Proben der Serie T-C versagten ausschließlich am Schweißnahtübergang, wie in Bild 8-19 zu erkennen ist.



Bild 8-19: Typische Versagensbilder der Serie TC

Figure 8-19: Typical failure patterns of series TC

Für eine Illustration der Ermüdungsversuchsergebnisse an Groß- und Kleinprüfkörpern werden diese zunächst in Wöhlerdiagramme eingetragen. Anschließend wird mithilfe des Prognoseintervalls (Abschnitt 3) die Ermüdungsfestigkeit berechnet.

Bild 8-20 zeigt auf der linken Seite alle Ergebnisse von Versuchen, bei denen das Versagen vom Schweißnahtübergang ausging. Dies entspricht allen Versuchsergebnissen der Kleinprobekörper TC und der Großprobekörper C. Da unklar ist, ob eine Berechnung mittels Nennspannungen (Detail 1, Tabelle 8.5 [1]) oder mittels korrigierter Nennspannungen (Detail 2, Tabelle 8.5 [1]) erfolgen soll, wurden zusätzlich korrigierte Nennspannungen der Versuchskörper ermittelt, siehe rechte Seite von Bild 8-20. Dies geschah mithilfe der validierten numerischen Modelle, die im Abschnitt 8.7 näher beschrieben sind.

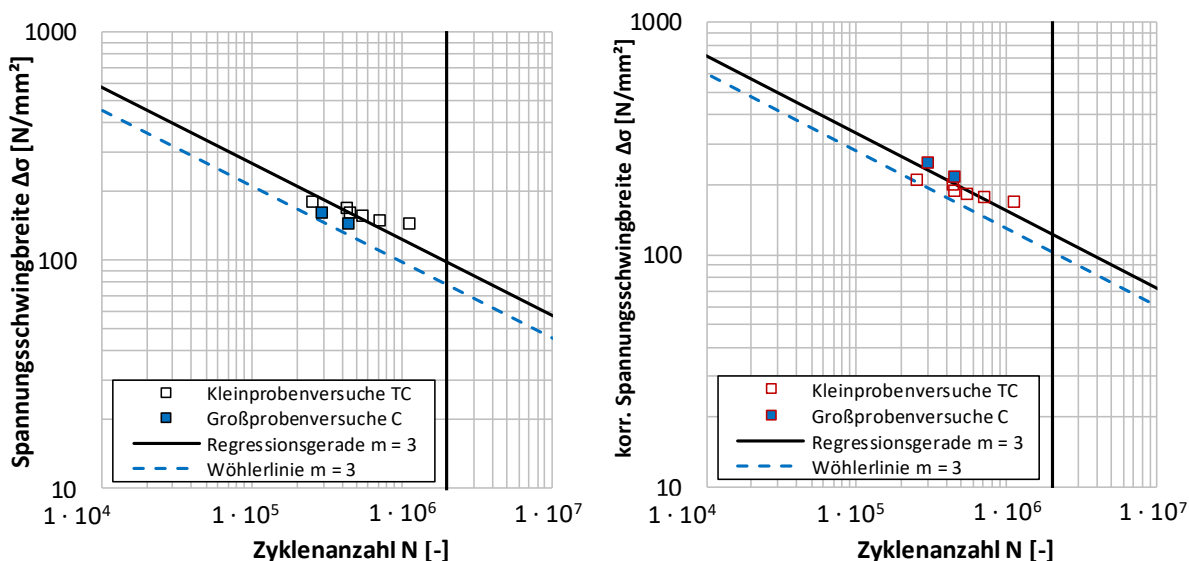


Bild 8-20: Darstellung der Versuchsergebnisse aller Probekörper mit Versagen am Schweißnahtübergang mit Nennspannungen (links) und korrigierten Nennspannungen (rechts)

Figure 8-20: Illustration of test results of all specimens with failure at the weld toe with nominal stresses (left) and modified nominal stresses (right)

Die korrigierten Nennspannungen wurden anhand der ersten Elementreihe an der Schweißnaht des Globalmodells in Form der Spannung in Trägerlängsrichtung ausgewertet. Wie in Bild 8-20 zu erkennen ist, liegen die Versuchsergebnisse auf Basis korrigierter Nennspannungen erwartungsgemäß etwas höher als die lediglich mit Nennspannungen ermittelten.

Tabelle 8-4 zeigt die berechneten Ermüdungsfestigkeiten für die Probekörper, die Detail 1 und Detail 2 der Tabelle 8.5 [1] zugehörig sind. Dabei wurden verschiedene Annahmen getroffen. Wertet man nur die Kleinprüfkörper auf Basis von Nennspannungen aus, Zeile 1 in Tabelle 8-4, kommt man mit 6 Prüfkörpern auf einen starken Zusammenhang der Daten mit einem Korrelationskoeffizient $|r|$ von 0,87 auf einen Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit von 83,6 MPa. Die wahre inverse Steigung der Stichprobe ist mit 5,95 deutlich flacher, als die bei der Auswertung zugrunde gelegte inverse Steigung $m = 3$.

Tabelle 8-4: Verschiedene Ermüdungsauswertungen der Probekörper mit Versagen am Schweißnahtübergang (Detail 1 und Detail 2, Tabelle 8.5 [1])

Table 8-4: Various fatigue evaluations of test specimens with failure at weld toe (Detail 1 and Detail 2, Table 8.5 [1])

Zeile	Spannungen	Maßstab	Probekörper	Anzahl	$ r $	m^*	$\Delta\sigma_c$ [MPa]
1	Nennspannungen	Klein	TC	6	0,87	5,95	83,6
2		Kombination	C, TC	8	0,67	4,61	78,2
3	Korrigierte Nennspannungen	Klein	TC	6	0,88	5,93	98,1
4		Kombination	C, TC	8	0,74	3,11	102,9

Wenn sowohl Groß- als auch Kleinprüfkörper auf Basis von Nennspannungen betrachtet werden (Zeile 2 Tabelle 8-4), lassen sich nur noch ein mittlerer Zusammenhang der Daten mit $|r| = 0,67$ und eine geringere Ermüdungsfestigkeit von 78,3 MPa feststellen. Dieser Wert liegt leicht unterhalb Kerbfall 80, der in DIN EN 1993-1-9 [1] angegeben ist. Auch die inverse Steigung der Wöhlerlinie wird geringer, was auf eine größere Kerbschärfe hinweist. Die geringere Ermüdungsfestigkeit der Großversuche im Vergleich zu den Kleinversuchen lässt sich zudem allein schon optisch im Wöhlerdiagramm (Bild 8-20 links) erkennen. Diese Ergebnisse zeigen, dass Untersuchungen der Ermüdungsfestigkeit von durchgeschweißten Schweißdetails an Stirnplattenverbindungen nicht ausschließlich an Kleinversuchen durchgeführt werden sollten, da dies zu unsicheren Ergebnissen führen kann.

Eine Auswertung der Kleinversuche TC anhand von korrigierten Nennspannungen führt zu ähnlichem Datenzusammenhang und wahrer Steigung, da in allen Simulationen ein annähernd gleicher Spannungskonzentrationsfaktor von 1,16 festgestellt werden konnte. Die resultierende Ermüdungsfestigkeit liegt mit 98,1 MPa höher, da nun die einwirkenden Spannungen größer sind. Bei der Simulationen der Großprobekörper wurde durchschnittlich ein deutlich höherer Spannungskonzentrationsfaktor von 1,46 festgestellt. Das Spannungsniveau der Großprobekörper liegt auf Basis von Nennspannungen im Vergleich zu den Kleinproben unterhalb. Durch den höheren Spannungskonzentrationsfaktor werden die Spannungen jedoch nach oben korrigiert, sodass sich bei gleichzeitiger Auswertung von Groß- und Kleinproben anhand korrigierter Nennspannungen ein besserer Datenzusammenhang von $|r| = 0,74$ ergibt. Die wahre Steigung liegt mit 3,11 sehr nah am vorgegebenen Wert und die Ermüdungsfestigkeit von 102,9 MPa deutlicher höher als Kerbfall 80 im Eurocode [1]. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Berechnung mittels korrigierter Nennspannungen definitiv empfohlen werden sollte, da ein Nachweis andernfalls auf der unsicheren Seite liegen könnte.

Bild 8-21 zeigt auf der linken Seite alle Versuchsergebnisse von Probekörpern, dessen Versagen von der Schweißnahtwurzel ausging. Dies trifft auf alle Probekörper der Kleinteilserie TB und alle Probekörper der Großbauteilserie A und B zu sowie auf einen Versuch der Serie LA. Verschiedene Möglichkeiten der Auswertung des Details 3 der Tabelle

8.5, welches das Versagen an der Schweißnahtwurzel abdeckt, sind in Tabelle 8-5 zu finden. Wertet man zunächst nur alle sechs Kleinprobekörper mit überstehender Stirnplatte, Serie TB, aus, ergibt sich bei einem starken Zusammenhang der Daten mit $|r| = 0,93$ eine Ermüdungsfestigkeit von 61,7 MPa. Die wahre inverse Steigung der Daten beträgt 4,06 und ist somit etwas flacher als die von DIN EN 1993-1-9 [1] angenommene inverse Steigung $m = 3$. Nimmt man hingegen die Versuchsergebnisse der zwei Großprobekörper hinzu, wird der Zusammenhang der Daten deutlich schlechter mit $|r| = 0,18$, was an der vergleichsweise langen Lebensdauer des Prüfkörpers B2 liegt, welcher einen Ausreißer nach oben darstellt. Durch die damit verbundene größere Streuung der Probekörper ergibt sich für diese Stichprobe eine deutlich geringere Ermüdungsfestigkeit von 47,6 MPa.

Tabelle 8-5: Verschiedene Ermüdungsauswertungen der Probekörper mit Versagen an der Schweißnahtwurzel (Detail 3, Tabelle 8.5 [1])

Table 8-5: Various fatigue evaluations of test specimens with failure at the weld root (Detail 3, Table 8.5 [1])

Zeile	Stirnplatte	Maßstab	Probekörper	Anzahl	$ r $	m^*	$\Delta\sigma_c$ [MPa]
1	Überstand	Klein	TB	6	0,93	4,06	61,7
2		Kombination	B, TB	8	0,18	3,40	47,6
3	Kombination	Klein	LA, TB	7	0,99	2,47	58,6
4	Kombination	Kombination	A, B, LA, TB	11	0,40	2,21	45,7

Eine weitere Auswertemöglichkeit stellt die Auswertung aller Kleinprobekörper dar. Durch die gemeinsame Auswertung der TB Probekörper mit dem einzigen LA Prüfkörper, der an der Schweißnaht versagt hat, ergibt sich ein praktisch voller Zusammenhang der Daten. Die Ermüdungsfestigkeit ist jedoch mit 55,4 MPa etwas geringer, als die der ausschließlichen Auswertung anhand TB Probekörper.

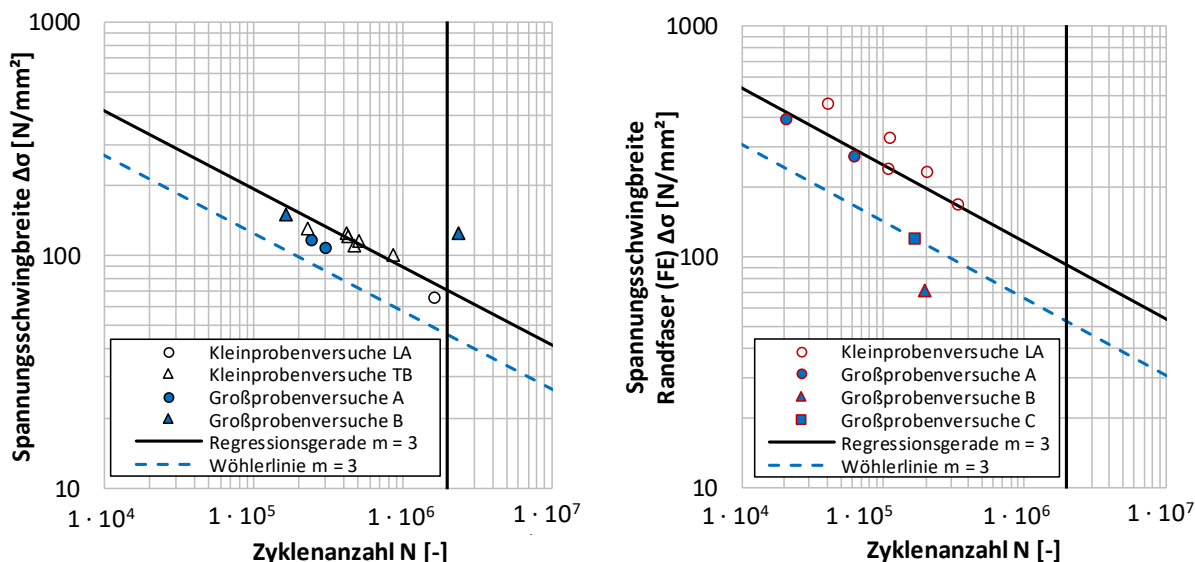


Bild 8-21: Darstellung der Versuchsergebnisse aller Probekörper mit Versagen an der Schweißnahtwurzel (links) und mit Versagen der Schrauben (rechts)

Figure 8-21: Illustration of test results of all specimens with failure at the weld root (left) and with failure of the bolts (right)

Bei der Auswertung aller 11 Probekörper jeglicher Serien, die an der Schweißnahtwurzel versagt haben, ergibt sich aufgrund der großen Streuung ein schwacher Zusammenhang der Daten mit $|r| = 0,40$ und eine wahre inverse Steigung der Stichprobe von 2,21. Die

Ermüdungsfestigkeit beträgt nichtsdestotrotz 45,7 MPa, was deutlich über der Kerbfallklasse 36* der DIN EN 1993-1-9 [1] liegt. Dementsprechend wäre eine Einstufung des Details 3 der Tabelle 8.5, Versagen an der Schweißnahtwurzel, in Kerbfallklasse 45 möglich. Hierzu muss jedoch erwähnt werden, dass die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnahtwurzel von zahlreichen Faktoren abhängig ist, wie bereits in Kapitel 6.5.1 beschrieben. Auch die starke Streuung der Versuchsergebnisse dieses Details, die bereits bei der Auswertung der Datenbankversuche festgestellt wurde, spiegelt sich anhand dieser Versuchsergebnisse wider.

Die Ermüdungsfestigkeit der Schrauben kann nicht direkt ausgewertet werden. Die Schrauben-DMS messen lediglich die Spannungsschwingbreite in der Mitte der Schraube. Biegeeffekte können über die Schrauben DMS nicht gemessen werden. Aus diesem Grund wurde die Biegespannungsschwingbreite im Rahmen der numerischen Simulationen bestimmt. Alle Informationen zu der Bestimmung der Biegespannungen in den Schrauben ist in Abschnitt 8.7 zu finden.

Bild 8-21 zeigt auf der rechten Seite alle Versuchsergebnisse von gebrochenen Schrauben, die numerisch nachgerechnet wurden. Dies trifft auf fünf Schrauben der Kleinteilserie LA, zwei Schrauben der Großbauteilserie A und jeweils eine der Serien B und C zu. Die Schraube der Großbauteilserie B liegt im Vergleich zu den anderen Ergebnissen auffällig niedrig. Zudem lässt sich Tabelle 8-2 entnehmen, dass die Dehnungsmessung trotz voller Vorspannung eine geringe Schraubenkraft anzeigt. Aufgrund dieser Diskrepanz wird die Schraube bei den Auswertungen nicht weiter betrachtet. Verschiedene Möglichkeiten der Auswertung der Schraube, Detail 14 der Tabelle 8.1, sind in Tabelle 8-6 zu finden. Wertet man zunächst nur alle fünf Schrauben der Kleinteilserie LA aus, ergibt sich bei einem starken Zusammenhang der Daten mit $|r| = 0,84$ eine Ermüdungsfestigkeit von 75,1 MPa. Die wahre inverse Steigung der Daten beträgt 2,0 und ist somit etwas steiler als die von DIN EN 1993-1-9 [1] angenommene Steigung $m = 3$.

Tabelle 8-6: Verschiedene Ermüdungsauswertungen der Probekörper mit Versagen der Schraube (Detail 14, Tabelle 8.1)

Table 8-6: Various fatigue evaluations of test specimens with failure of the bolt (Detail 14, Table 8.1)

Zeile	Stirnplatte	Maßstab	Probekörper	Anzahl	$ r $	m^*	$\Delta\sigma_c$ [MPa]
1	Bündig	Klein	LA	5	0,84	2	75,1
2		Kombination	A, LA	7	0,81	2,45	71,2
3	Kombination	Kombination	A, C, LA	9	0,74	1,61	52,7

Unter Hinzunahme der zwei Schrauben aus Großbauteilserie A ergibt sich eine etwas flachere wahre Steigung bei einem noch immer starken Zusammenhang der Daten. Der resultierende Kerbfall liegt mit 71,2 MPa nur etwas niedriger als derjenige bei alleiniger Auswertung der Kleinbauteile. Wertet man nun alle Ergebnisse der Serien A, C und LA aus, ergibt sich bei einem mittleren Datenzusammenhang ein Kerbfall von 52,7, was den Kerbfall 50 der DIN EN 1993-1-9 [1] bestätigt.

8.7 Numerische Simulationen

Numerical simulation

Im Anschluss an die Durchführung der Versuche wurden diese numerisch nachgerechnet. Dies dient zunächst dazu, korrigierte Nennspannungen und Biegespannungen der Schrauben zu ermitteln, siehe Abschnitt 8.6. Zudem können die numerischen Modelle anhand der Versuche validiert werden und nachfolgend für weitere Untersuchungen von Einflussfaktoren genutzt werden. Im Folgenden werden die Modellerstellung, die Validierung der numerischen Modelle, sowie Parameterstudien zur Untersuchung von Einflussparametern, vorgestellt.

8.7.1 Modellerstellung

Modelling

Zur Simulation der Ermüdung von Stirnplattenverbindungen und T- und L-Stößen wurde das FE Programm ABAQUS 6.14 verwendet. Um für die allgemeinen Untersuchungen möglichst flexibel und effizient Modelle erstellen zu können, wurde ein parametrisiertes Skript auf PYTHON-Basis geschrieben. Das Skript erlaubt die Variation der Geometrie (Querschnittsabmessungen, Schweißnahtart, Spannweite, Lasteinleitung), Netzgröße sowie Belastungsgrößen für Groß- sowie Kleinprobekörper. Zur Anwendung des Kerbspannungskonzeptes wird in der Modellbildung die Submodelltechnik verwendet. Dabei wird zunächst ein globales Modell erstellt, welches fein genug diskretisiert ist, um Ergebnisgrößen ausreichend genau abzubilden. In einem nächsten Schritt wird ein Submodell erstellt, in dem eine deutlich feinere Netzgenerierung, die zur Anwendung des Kerbspannungskonzeptes erforderlich ist (siehe Abschnitt 2.3.4.2), angewendet wird. Bild 8-22 zeigt beispielhafte Modelle der Groß- und Kleinbauteile und deren Randbedingungen.

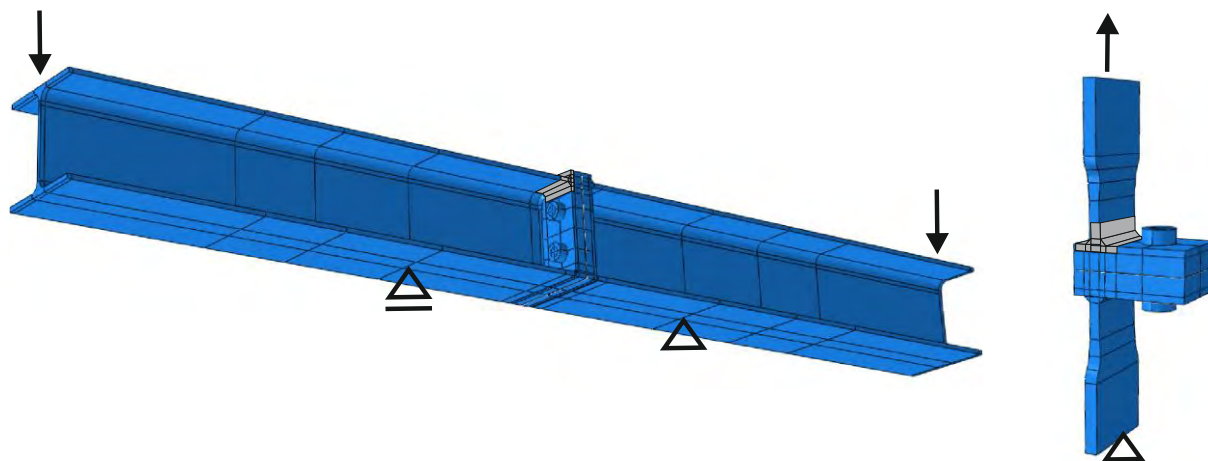


Bild 8-22: Darstellung der FE-Modelle und deren Randbedingungen für Großbauteile (links) und Kleinbauteile (rechts) anhand der A und LA Konfigurationen

Figure 8-22: Illustration of the FE models and their boundary conditions for large components (left) and small components (right) shown by means of the A and LA configurations)

Die Submodelle, welche für Groß- und Kleinbauteile einer Konfiguration nur den relevanten Bereich der Schweißnaht darstellen und daher identisch sind, sind hierbei grau hinterlegt. Das Submodell besitzt an seinen Kontaktflächen zum Globalmodell Randbedingungen, sodass die exakte Beanspruchungssituation des Globalmodells auf das Submodell übertragen wird. Die Schraube wird vereinfacht ohne Gewinde und mit rundem Schraubenkopf modelliert. Die Schweißnähte im Globalmodell besitzen die Form eines

dreiseitigen Prismas, währen im Submodell gemäß Korbspannungskonzept Übergangsradien von einem Millimeter modelliert werden. Im Fall von Kehlnahen wird in beiden Modellen ein Spalt beliebiger Größe zwischen Flansch bzw. Zugblech und Stirnplatte modelliert. Träger bzw. Zugblech, Schweinahen und Platte werden als fest verbunden modelliert. Die Oberflächen zwischen den beiden Platten und zwischen Schraubenkopf, Mutter, Schraubenschaft und Platte werden als Kontaktflächen modelliert, wobei eine Separation der Flächen ermöglicht wird. Zusammengehalten werden beide Probekorperhalfen letztlich realitatskonform durch die Vorspannung der Schrauben. Bei der Materialdefinition wird von elastischem Verhalten mit einem E-Modul von 210000 MPa und einer Querkontraktionszahl von 0,3 ausgegangen.

Bevor eine Last aufgebracht wird, werden in einem separaten Berechnungsschritt die Schrauben vorgespannt. Hierfür gibt der Nutzer dem Modell je Schraube eine Kraft vor, die in der Schraubenachse aufgebracht wird. Im nächsten Schritt erfolgt dann die eigentliche Belastung. Großbauteile werden stets durch Biegung mit konstantem Biegemoment und fehlender Querkraft im Bereich der Verbindung beansprucht (4-Punkt-Biegung). Die Kleinbauteile hingegen werden auf Zug beansprucht. Die Beanspruchung kann zum einen in Form eines Sinusförmigen Zyklus von Mittelkraft über Minimal- und Maximalkraft erneut bis hin zu Mittelkraft aufgebracht werden. Zum anderen kann in einem ersten Schritt vereinfachter Weise die Minimalkraft aufgebracht werden, worauf hin die Beanspruchung linear bis zur Maximalkraft gesteigert wird. Bei den ausgewerteten Spannungsschwingbreiten zeigten sich keine Unterschiede durch die Belastungsmethode.

Bild 8-23 zeigt die Diskretisierung der Großbauteile, der Kleinbauteile sowie des Submodells dieser Modelle.

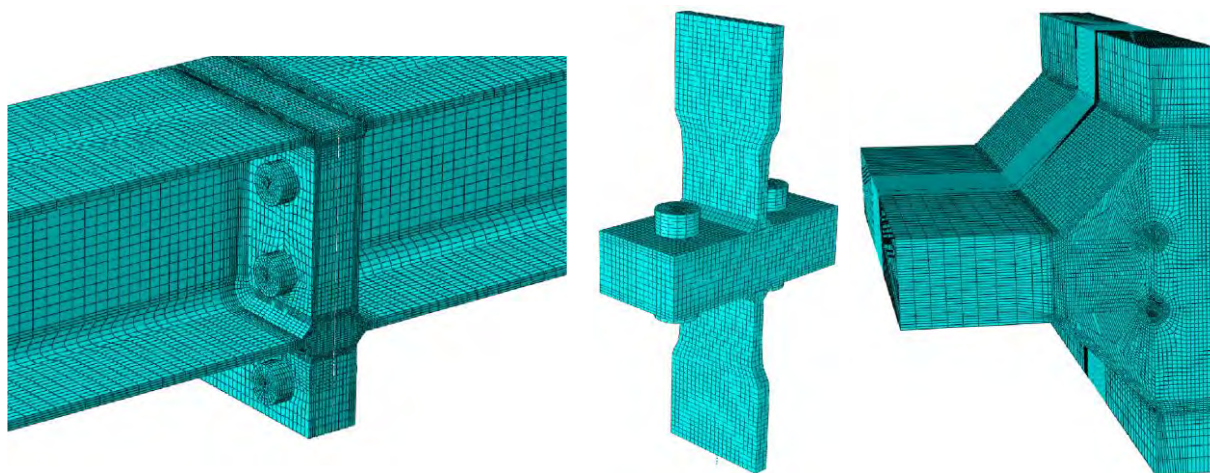


Bild 8-23: Diskretisierung der FE-Modelle für Großbauteile (links) und Kleinbauteile (Mitte) und für das Submodell (rechts) anhand der B und TB Konfigurationen

Figure 8-23: Discretization of the FE models for large components (left) and small components (center) and for the sub-model (right) by means of the B and TB configurations

Relevante Bereiche, wie z.B. die Schweinahen, wurden in den Globalmodellen feiner vernetzt. Ein Globalmodell der Großbauteilserie B hat z.B. um die 320.000 Elemente, während ein Modell der Kleinteilserie TB um die 25.000 Elemente besitzt. Beim Submodell wurden weiterhin die Anforderungen des Korbspannungskonzeptes eingehalten (vgl. Abschnitt 2.3.4.2), sodass sich bei den Konfigurationen B oder TB beispielsweise eine Elementzahl von bis zu 800.000 ergibt. Bei allen Modellen wurden Volumenelemente mit

linearem Verschiebungsansatz und reduzierter Integration „C3D8R“ verwendet, sodass in den Submodellen bei einem Referenzradius von 1 mm Elementgrößen von weniger als 0,16 mm modelliert wurden.

8.7.2 Validierung der FE-Modelle anhand von Versuchen

Validation of the FE models by means of tests

Bevor die Versuche mithilfe der numerischen Modelle nachgerechnet wurden, wurden Einflussgrößen der Modelle validiert. Zur Untersuchung des Einflusses der Diskretisierung wurde die Netzweite an einem beispielhaften Globalmodell halbiert. Hierbei ergaben sich Abweichungen der Schraubenspannungen von nur 0,4%. Auch auf die Schweißnahtspannungen hat eine feinere als die gewählte Diskretisierung kaum Auswirkungen. Um den Einfluss des Elementtyps auszumachen wurden beispielhaft Elemente ohne reduzierte Integration „C3D8“ und Elemente mit quadratischem Verschiebungsansatz „C3D20R“ und reduzierter Integration verwendet. Im Submodell wurden bei der Verwendung der C3D20R Elemente Netzweiten von 0,25 gemäß Kerbspannungskonzept verwendet. Auf die Schraube hat die Änderung des Elementtyps mit einer Abweichung von bis zu 0,4% kaum Auswirkung. Die Kerbspannung im Submodell ist bei C3D8 Elementen um bis zu 4% kleiner. Bei C3D20R Elementen und etwas größerem Netz ist die Kerbspannung allerdings bis zu 8% kleiner. Auf der sicheren Seite können dementsprechend die C3D8R Elemente mit der feinen Vernetzung beibehalten werden.

Da die Größe des Wurzelspalts bei den A/LA- und B/TB-Probekörpern nicht gemessen werden konnte, wurde der Einfluss des Wurzelspaltes ebenfalls numerisch analysiert. Es wurden B-Submodell mit Spaltgrößen von 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm und 2 mm simuliert, wobei sich maximale Abweichungen der Kerbspannungen von bis zu 2,6% ergeben, sodass ein Einfluss als vernachlässigbar angesehen werden kann. Die Spaltgröße wurde zur Nachrechnung der Versuche und Durchführung der Studie zu Einflussparametern zum mittleren Wert von 1 mm gewählt.

Die Geometrie der numerischen Modelle wurde anhand der gemessenen Geometrie der Probekörper modelliert. Die während der Versuche aufgezeichnete Kraft wurde im numerischen Modell als Beanspruchung aufgebracht. Anhand der applizierten Dehnungsmessstreifen können Messgrößen in Versuch und Simulation des Globalmodells miteinander verglichen werden. Bild 8-24 zeigt zwei Spannungsplots am Globalmodell der Großbauteilsimulation C1 und am Globalmodell der Kleinteilsimulation TC1.

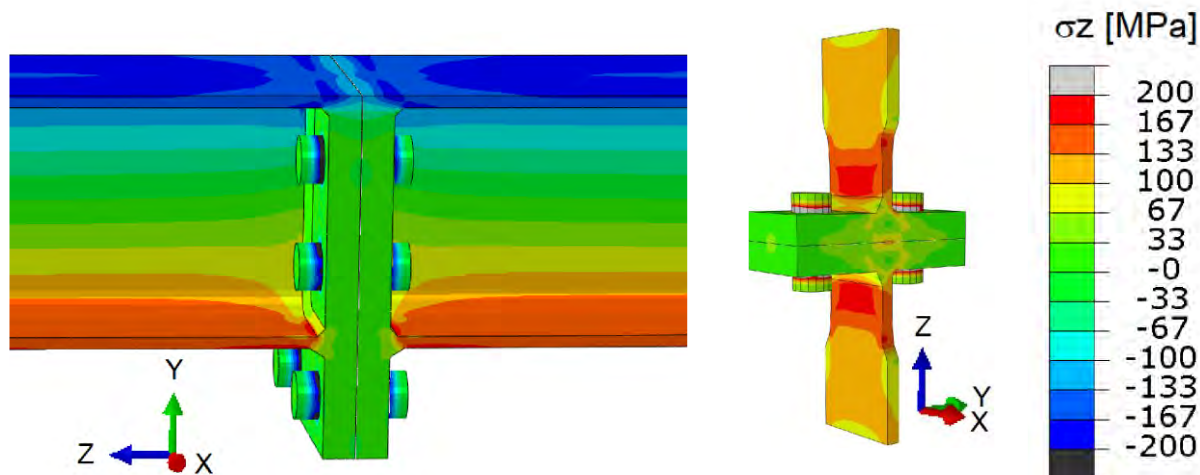


Bild 8-24: Längsspannungsplot des Probekörper C1 (links) und TC1 (rechts) mit gleicher Legende

Figure 8-24: Longitudinal stress plot of the specimen C1 (left) and TC1 (right) with same legend

Bei den Großbauteilversuchen wurde der DMS1 zur Steuerung der Unwuchtmotoren verwendet, sodass dieser nicht zur Aufzeichnung von Messwerten verwendet werden konnte. Bild 8-25 zeigt beispielhaft die Verläufe der übrigen Dehnungsmessstreifen des Probekörpers B1, welche mit Hilfe des E-Moduls in Spannungen bzw. Spannungsschwingbreiten umgerechnet wurden und hier für einen Zyklus dargestellt sind. Es lässt sich eine gute Übereinstimmung von Versuch und Simulation feststellen, wobei gelegentlich Spannungen minimal über- oder unterschätzt werden.

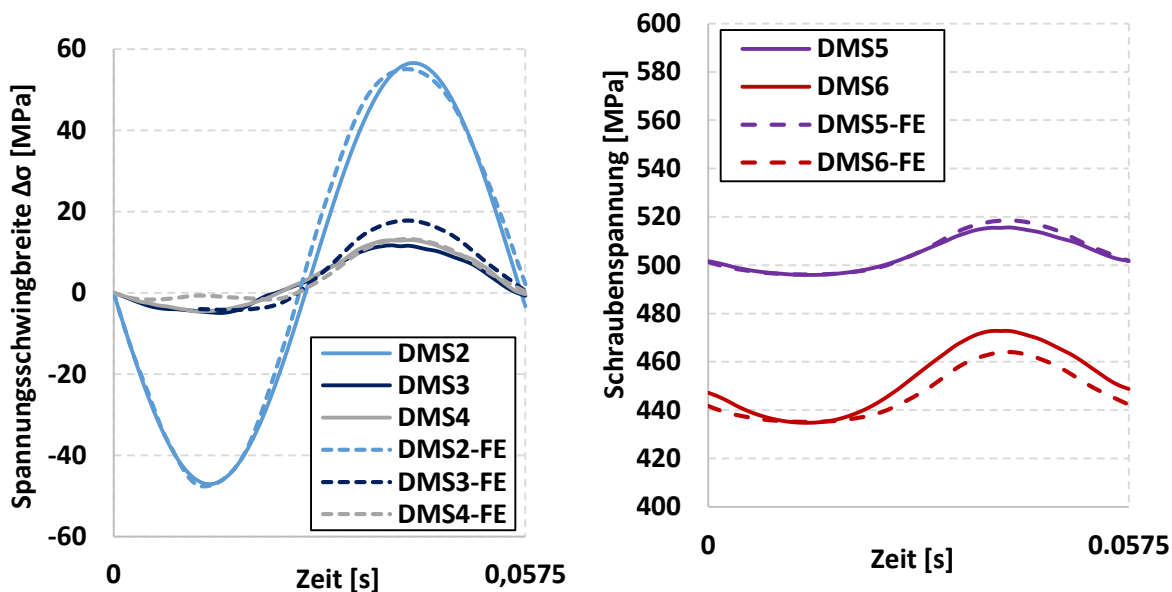


Bild 8-25: Vergleich der experimentell und numerisch bestimmten Dehnungen an Probekörper B1

Figure 8-25: Comparison of experimentally and numerically determined strains on test specimens B1

Bei den Kleinprobekörpern wurde die Modellvalidierung anhand der statischen Zugversuche durchgeführt. Bild 8-26 zeigt am Beispiel von TB1 die Verläufe der DMS1 bis DMS 3 in Spannungen überführt und in Abhängigkeit der statischen Zugkraft. Die numerischen Verläufe der Spannungen werden bei TB1 leicht unterschätzt. Bei anderen Probekörpern ergeben sich jedoch teilweise auch minimale Überschätzungen der Spannungen, sodass das numerische Modell die Versuche im Mittel gut abbildet.

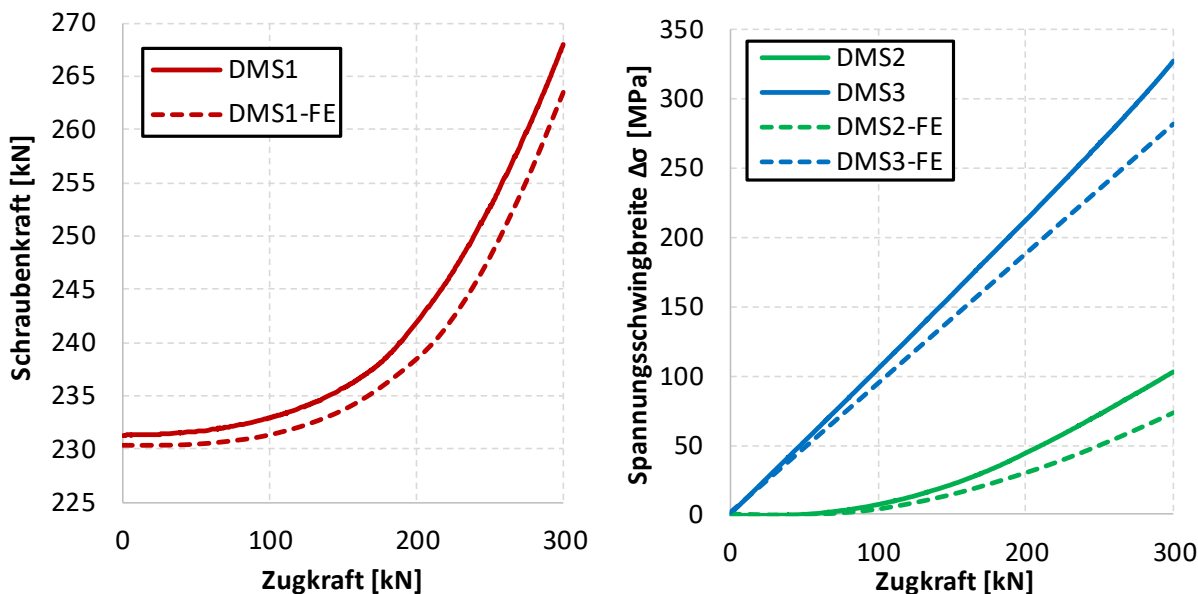


Bild 8-26: Vergleich der experimentell und numerisch bestimmten Dehnungen an Probekörper TB1
 Figure 8-26: Comparison of experimentally and numerically determined strains on test specimens TB1

Bei den Probekörpern, wo ein Versagen am Schweißnahtübergang eintrat, Serien C und TC, wurde zusätzlich zur Nennspannungen die korrigierte Nennspannung ermittelt, da dies in DIN EN 1993-1-9 [1] bei verformbaren Anschlussblechen gefordert wird. Bild 8-27 zeigt die Verläufe der korrigierten Nennspannungen im Vergleich zu den Nennspannungen der C und TC Serien. Die korrigierten Nennspannungen wurden am ersten Element vor der Schweißnaht für alle Elemente über die Breite des Zugflansch bzw. Zugblechs im Globalmodell in Form der Längsspannung im Probekörper ausgewertet. Bei der Auswertung der Simulationen von Großprobekörpern (links in Bild 8-27) ergeben sich zwei lokale Maxima, die ungefähr 50 mm entfernt von den Flanschenden auf der Höhe der beiden vorgespannten Schrauben liegen. Das Minimum in Flanschmitte bei ca. 120 mm liegt auf der Höhe des Stegs.

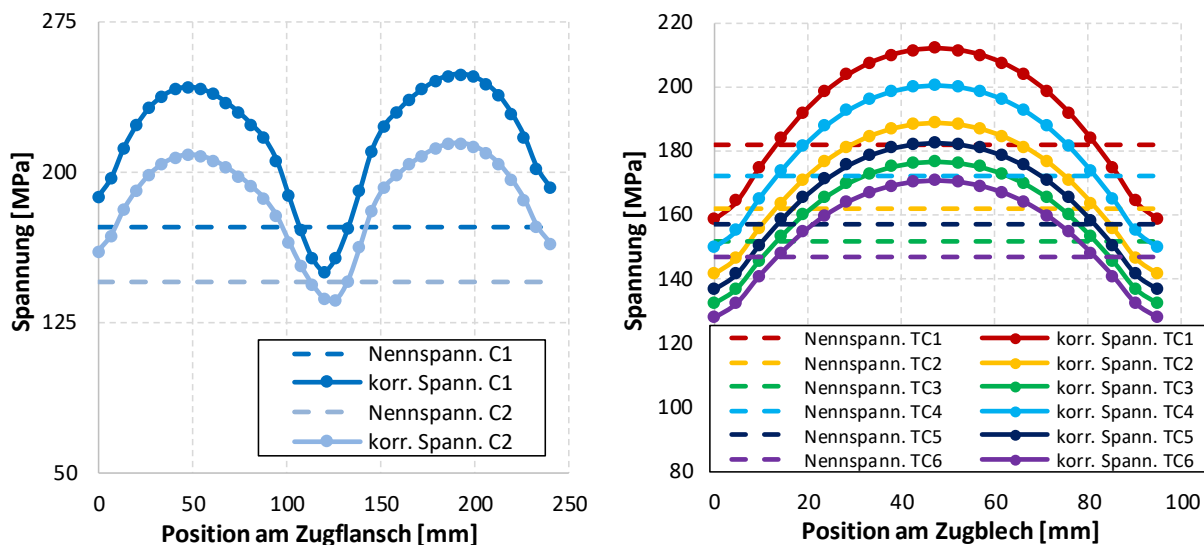


Bild 8-27: Verteilung von Nennspannungen und korrigierten Nennspannungen über die Länge des Zugflansches bzw. Zugblechs aller Probekörper aus Serie C (links) und TC (rechts)

Figure 8-27: Distribution of nominal stresses and modified nominal stresses over the length of the tension flange or tension plate of all specimens from Series C (left) and TC (right)

Die maximalen korrigierten Spannungen liegen bei den Großprobekörpern im Mittel 46 % höher als die Nennspannungen, sodass sich ein Spannungskonzentrationsfaktor von 1,46 ergibt.

Bei den Kleinprobekörpern (rechts in Bild 8-27) ergibt sich analog ein Spannungsmaximum auf der Höhe der vorgespannten Schraube in Probekörpermitte. Hier ist die Spannungskonzentration geringer als bei den Großproben, denn die Spannungserhöhung beträgt im Mittel nur 16 %. Der Spannungskonzentrationsfaktor beträgt also 1,16.

Auch für die Kerbfallauswertung der Schrauben sind numerische Simulationen notwendig. Bild 8-25 und Bild 8-26 zeigen, dass die experimentell ermittelten Spannungen in Schraubenmitte numerisch gut abgebildet werden können. Die größeren Biegespannungen, die an der Randfaser der Schraube entstehen sind jedoch maßgebend und müssen daher zusätzlich numerisch bestimmt werden. Diese Randspannungen wurden für alle Schrauben bestimmt, die während der Ermüdungsversuche versagt haben und für die Kerbfallableitung verwendet wurden. Bild 8-28 zeigt die numerisch ermittelten Spannungen in Schraubenmitte und -rand auf der linken Seite für einen B Probekörper. Dargestellt sind die Spannungen über die Kraft in dem Abschnitt des Zugflansches, der im T-Modell angesetzt wird und gleichzeitig der Breite der Kleinprobekörper entspricht. Auf der rechten Seite in Bild 8-28 sind die Schraubenspannungen eines LA Probekörpers über die Kraft im Zugblech aufgetragen. Zunächst lässt sich feststellen, dass die Randspannungen in jedem Fall größer als die Spannungen in Schraubenmitte sind und aus diesem Grund bei der Kerbfallberechnung bzw. Ermüdungsbemessung berücksichtigt werden müssen. Zudem ist die Schwingbreite bei Probekörper B deutlich geringer als bei Probekörper LA. Dies liegt am Stirnplattenüberstand und der zusätzlichen Schraubenreihe der Konfiguration B, welche die Biegung der Schraube deutlich mindert.

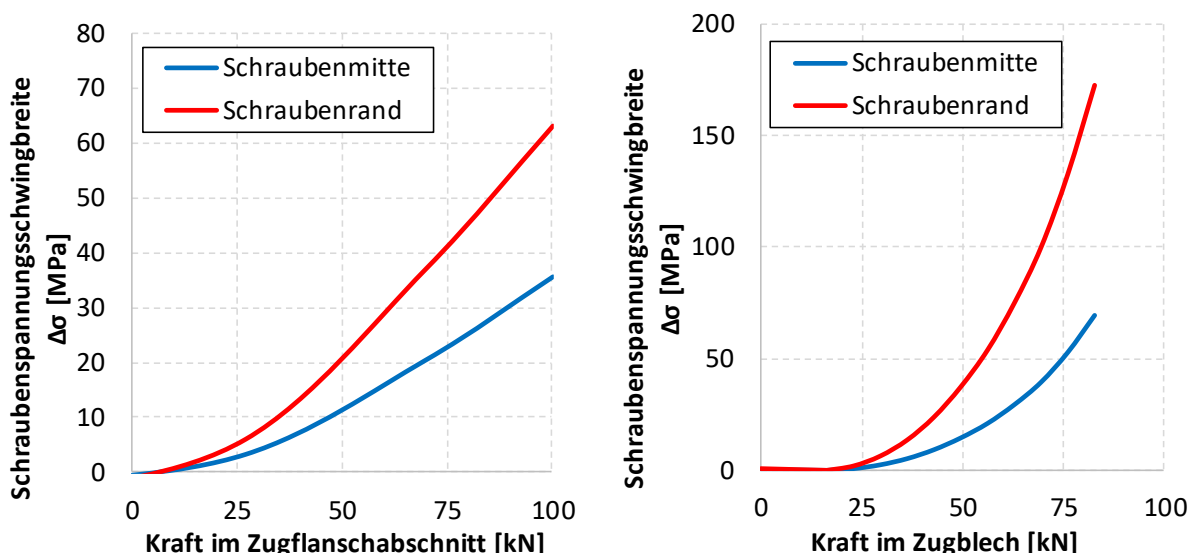


Bild 8-28: Darstellung der numerisch ermittelten Spannungsschwingbreite in Schraubenmitte und -rand über die Kraft im Zugflanschabschnitt von B2 (links) bzw. Zugblech von LA2 (rechts)

Figure 8-28: Illustration of the numerically determined stress range in bolt centre and bolt edge over the force in the tension flange section of B2 (left) or the tension plate of LA2 (right)

Nachdem die Globalmodelle der Groß- und Kleinversuche validiert wurden, wurden die Submodellberechnungen durchgeführt. Bild 8-29 zeigt zwei Spannungsplots der Submodelle von C1 und TC1. Hier wird deutlich, dass die Geometrie der Submodelle annähernd

identisch ist, die Spannungsverteilung bei den Kleinversuchen jedoch aufgrund der Doppelsymmetrie etwas gleichmäßiger erscheint.

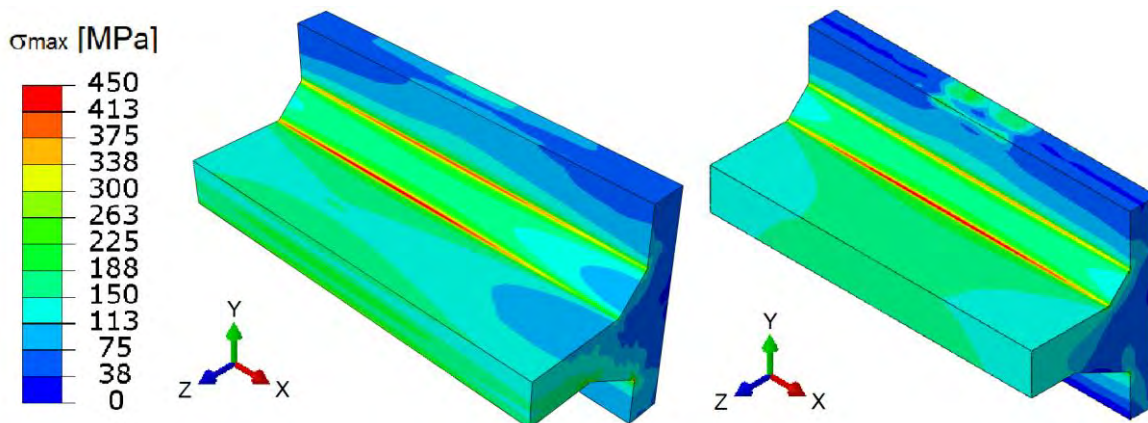


Bild 8-29: Kerbspannungsplot des Probekörper C1 (links) und TC1 (rechts) am Submodell mit gleicher Legende

Figure 8-29: effective notch stress plot of the specimen C1 (left) and TC1 (right) on Submodel with same legend

Bei den Probekörpern der Serie C und TC trat das Versagen am Schweißnahtübergang auf. Dieser Versagensort kann anhand der Submodellsimulationen bestätigt werden, siehe Bild 8-29. Bei allen Probekörpern mit Schweißnahtwurzeln gibt es zwei mögliche Versagensstellen: Schweißnahtwurzel und Schweißnahtübergang. Bild 8-30 zeigt die beispielhafte Auswertung von Kerbspannungsverläufen über die Nennspannungen der jeweiligen Stellen anhand einer Großbauteilsimulation B1 und einer Kleinprobensimulation TB1.

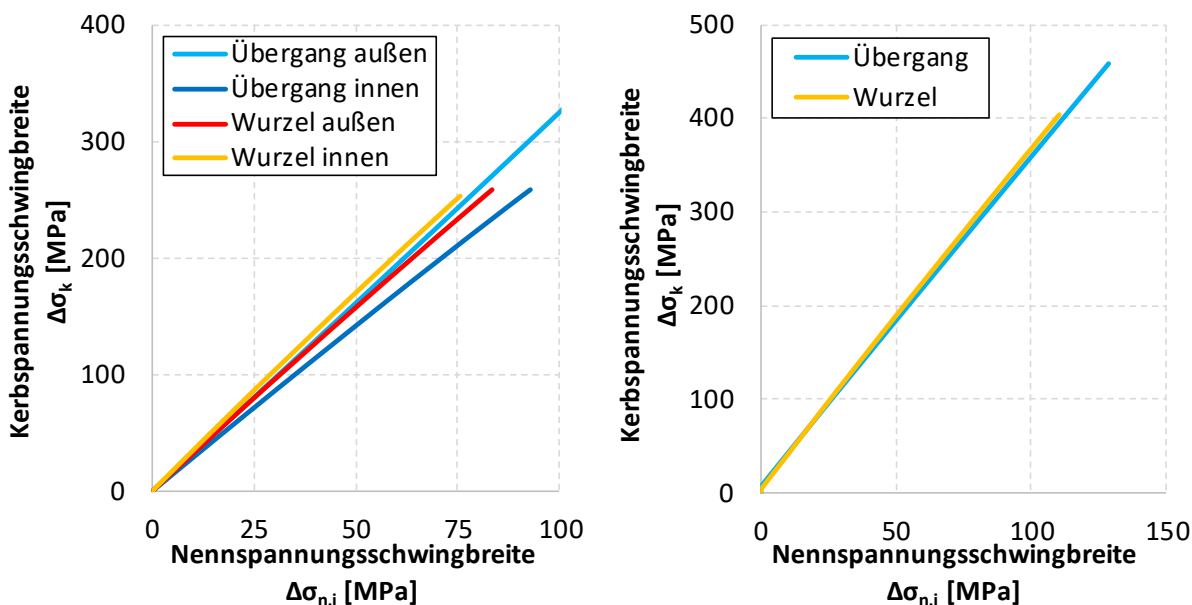


Bild 8-30: Verlauf der Kerbspannungsschwingbreiten des Probekörpers B1 (links) und TB1 (rechts)

Figure 8-30: Progression of the effective notch stress ranges of specimen B1 (left) and TB1 (right)

Bei den Großbauteilen kommen aufgrund des Spannungsgradienten über die Höhe der Verbindung vier potentielle Versagensstellen infrage: Innere Schweißnahtwurzel und -übergang innerhalb des Profils und Schweißnahtwurzel und -übergang außerhalb des Profils im Stirnplattenüberstand. Aufgrund von Symmetrie in Geometrie und Belastung des Kleinprobekörpers werden hier nur ein Schweißnahtübergang und eine Schweißnahtwurzel betrachtet. Man erkennt anhand der Diagramme, dass die Kerbspannungen an der

Schweißnahtwurzel einen leicht steileren Verlauf besitzen. Dies weist auf eine stärkere Kerbschärfe und höhere Kerbformzahl hin, was sich in den Versuchen ebenfalls gezeigt hatte.

Die Kerbformzahl k_k stellt das Verhältnis von Kerb- zu Nennspannungen dar und berechnet sich gemäß (2-19) wie folgt:

$$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{nenn}} \quad (8-13)$$

Mithilfe der berechneten Kerbspannungsschwingbreite und der Wöhlerlinie 225 lassen sich die ertragbaren Zyklenzahlen bzw. die Kerbfälle gemäß Kerbspannungskonzept folgendermaßen berechnen:

$$N_k = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{225}{\Delta\sigma_k}\right)^3 \text{ bzw. } \sigma_{nenn} = \frac{225}{k_k} \quad (8-14)$$

Diese können mit den mittels Nennspannungskonzept prognostizierten und über Versuche ermittelten Zyklenzahlen verglichen werden. Die Verläufe der Kerbspannungen über die Nennspannungen weisen einen linearen Charakter auf, sodass Kerbformzahlen auf jegliche Spannungsniveaus übertragbar sind.

Bild 8-31 stellt einen Vergleich der Zyklenanzahl da, die durch Versuche und Berechnungen mit Hilfe des Nennspannungs- und Kerbspannungskonzeptes für ein Versagen an der Schweißnahtwurzel (links) und dem Schweißnahtübergang (rechts) ermittelt wurden.

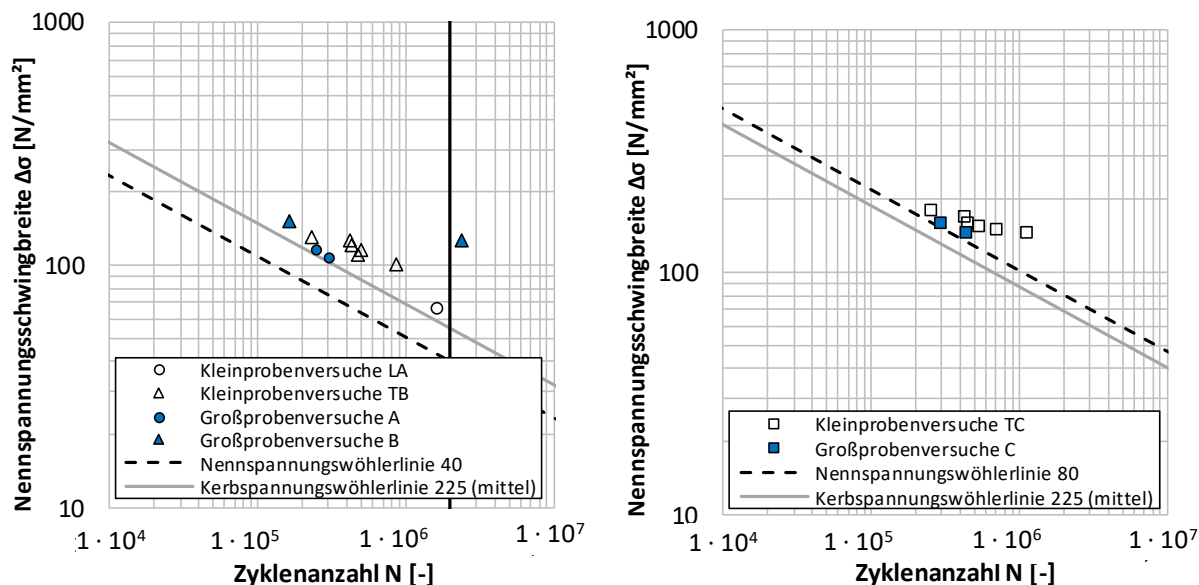


Bild 8-31: Vergleich von Versuchsergebnissen und mittels Kerbspannungskonzept ermittelten Ermüdungs-festigkeiten für die Schweißnahtwurzel (links) und den Schweißnahtübergang (rechts)

Figure 8-31: Comparison of test results and fatigue strengths for the weld root (left) and the weld toe (right) determined using effective notch stress concept

Bei einem Versagen der Schweißwurzel führt das Nennspannungskonzept zu den konservativsten Ergebnissen, siehe unterste Linie auf der linken Seite in Bild 8-30. Die Ergebnisse des Kerbspannungskonzeptes führen zu einer wirtschaftlicheren und realistischeren Anzahl von Zyklen. Bezüglich der Vorhersage des Versagens am Schweißnahtübergang ergibt die gemittelte Kerbspannungswöhlerlinie eine konservativere Einschätzung als das Nennspannungskonzept, siehe rechte Seite Bild 8-30. Dies bestätigt, dass die Anwendung korrigierter Nennspannungen (siehe Detail 2 der Tabelle 8.5 [1]) oder

lokaler Konzepte für die Ermüdungsbemessung am Schweißnahtübergang von Stirnplattenverbindung notwendig ist, um konservative Einschätzungen zu erhalten.

8.7.3 Parameterstudie zu verschiedenen Einflussparametern

Parametric study on different influencing parameters

Die experimentellen Untersuchungen von Stirnplattenverbindungen mit vorgespannten Schrauben haben bereits wertvolle Ergebnisse zur Einschätzung des Ermüdungsverhaltens ergeben. Um jedoch gezielte Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit untersuchen zu können, sind weitergehende Analysen notwendig. Mithilfe der validierten numerischen Modelle (siehe Abschnitt 8.7.2) können verschiedene Geometrieinflüsse auf die Ermüdung der Stirnplattenverbindungen untersucht werden.

8.7.3.1 Konzept

Concept

Die im Folgenden vorgestellte Parameterstudie wurde am Großmodell der Konfiguration B und am Kleinmodell der Konfiguration TB durchgeführt (siehe Bild 8-7). Diese Variante der Stirnplattenverbindung ermöglicht eine Einschätzung der Ermüdungsfestigkeit der Schweißnahtwurzel, des Schweißnahtübergangs und der Schraube in einer Stirnplattenverbindung mit Überstand. Konfiguration A bzw. LA wird nicht weiter betrachtet, da eine Ausführung ohne Stirnplattenüberstand vermieden werden sollte. Wie die Versuchsergebnisse aus Abschnitt 8.6 zeigen, wird die Schraube in dieser Art der Stirnplattenverbindung durch eine enorme Biegebeanspruchung belastet, sodass diese aus ermüdungstechnischer Sicht kritisch zu bewerten ist. Bei Konfiguration C bzw. TC ist nur der Schweißnahtübergang von Relevanz, der durch die hier beschriebenen Untersuchungen der Modelle B und TB zumindest in symmetrischer Form (DHV-Naht) abgedeckt wird.

Zunächst werden die Geometrieinflüsse der Stirnplattenverbindung getrennt untersucht, sodass ausgehend von der Geometrie der experimentell untersuchten Probekörper immer nur ein Parameter variiert wurde. Auf diese Weise kann der Einfluss eines Parameters konkret bestimmt werden, wobei jedoch in Grenzbereichen teilweise unrealistische Geometrieverhältnisse der Stirnplatten entstehen. Die Parameter umfassen:

- Stirnplattendicke (Abschnitt 8.7.3.2)
- Schraubendurchmesser (Abschnitt 8.7.3.3)
- Schraubenabstand - vertikal und horizontal (Abschnitt 8.7.3.4)
- HEA-Profilreihe (Abschnitt 8.7.3.5)

Um den Größeneffekt auch in realistischen Verbindungen betrachten zu können, wurden ferner realistische typisierte Stirnplattenverbindungen verschiedener Dimensionen analysiert (Abschnitt 8.7.3.6).

In allen Untersuchungen wurde die Belastung so gewählt, sodass am Schweißnahtübergang im Bereich des Verbindungsstoßes eine Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma = 100 \text{ MPa}$ vorhanden ist. Das Spannungsverhältnis wird konsistent zu $R = 0,1$ gewählt. Die Vorspannung der Schrauben wird entsprechend der Regelvorspannkraft nach EN 1993-1-8 [64] und EN 1090-2 [99] gewählt.

Zur Auswertung der durchgeführten Simulationen aller Studien werden bezüglich des Globalmodells die Schraubenspannungen der sich im Zugbereich befindlichen Schrauben

herangezogen. Bei Betrachtung der Spannungsschwingbreiten in Schraubenlängsrichtung werden die Biegespannungen in Schraubenmitte ausgewertet. Bezüglich der Schweißnahtspannungen werden die Spannungen am Schweißnahtübergang und an der Schweißnahtwurzel untersucht. Hierbei wird nur bei den Großmodellen zwischen dem inneren Schweißnahtübergang bzw. der inneren Schweißnahtwurzel innerhalb des Profils („Ü-I“ bzw. „W-I“) und dem äußeren Schweißnahtübergang bzw. der äußeren Schweißnahtwurzel („Ü-A“ bzw. „W-A“) im Überstandbereich der Stirnplatte differenziert.

8.7.3.2 Einfluss der Stirnplattendicke

Influence of plate thickness

Zunächst wurde die Stirnplattendicke variiert. Zur Untersuchung des Einflusses auf die Schraube wird das Globalmodell herangezogen. Bild 8-32 zeigt die Spannungsschwingbreite der Schraube über die Nennspannung im Flansch, aufgetragen für verschiedene Stirnplattendicken. Erwartungsgemäß sind die Spannungsschwingbreiten bei kleinen Stirnplattendicken sehr hoch, da die Verformbarkeit der Platte groß ist. Dieser Trend trifft gleichermaßen auf Groß- und Kleinmodelle zu, jedoch sind die Spannungen im Kleinmodell tendenziell, vor allem bei kleinen Stirnplattendicken, geringer. Dies kann auf die asymmetrische Belastungssituation beim Großmodell zurückgeführt werden.

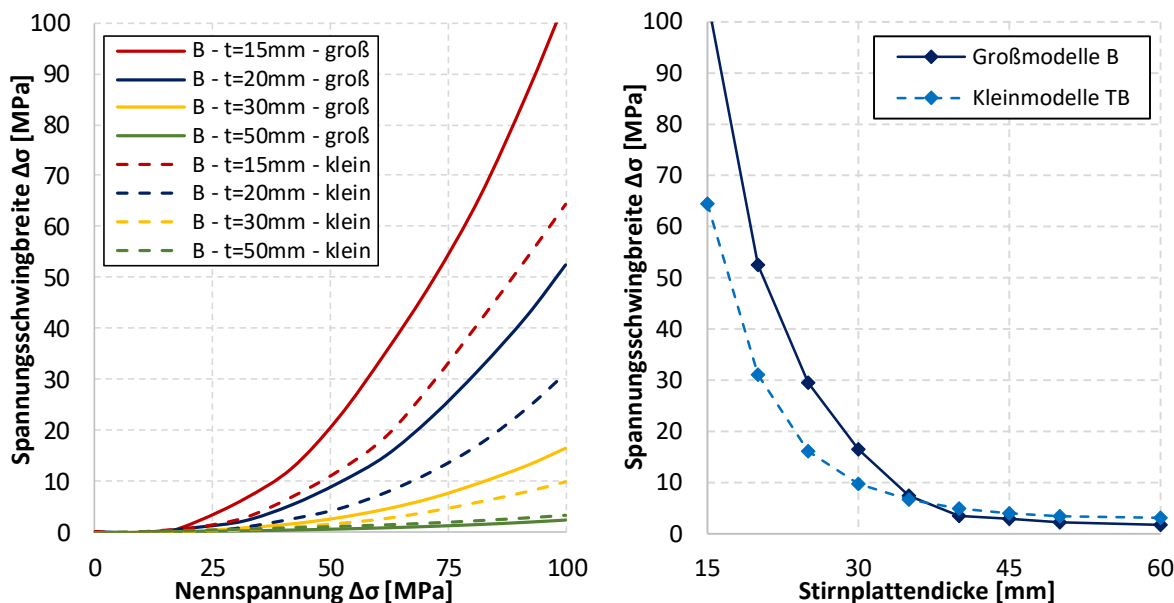


Bild 8-32: Spannungsschwingbreite der Schraube über Nennspannung am Flansch (links) und Stirnplattendicke (rechts) für verschiedene Stirnplattendicken t in Groß- und Kleinmodellen

Figure 8-32: Stress range in bolt over nominal stress at flange depending on end plate thickness t in large-scale and small-scale models

Folglich sind ausreichend dicke Stirnplatten hinsichtlich der Schraube zu empfehlen, wobei ab einer bestimmten Dicke, hier 40 mm, keine große Reduktion der Spannungsschwingbreite mehr zu erwarten ist und eine Steigerung der Plattendicke unwirtschaftlich wird. Zur Bewertung der Spannungsschwingbreiten in der Schweißnaht wird das Kerbspannungskonzept, siehe Abschnitt 2.3.4.2, mithilfe der Submodell-Simulationen angewandt.

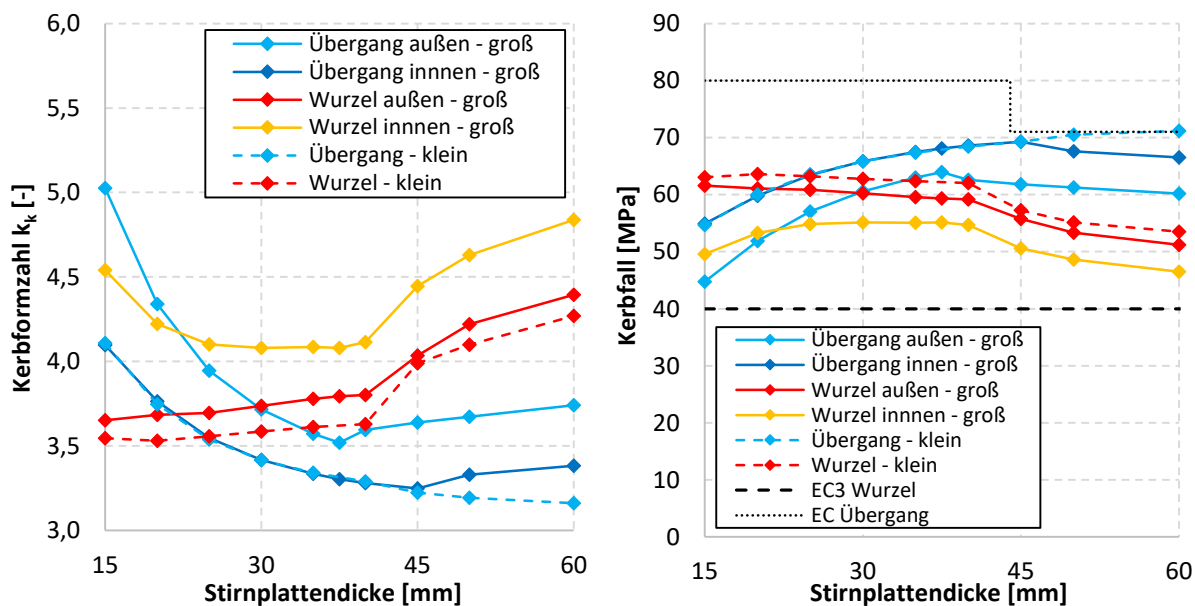


Bild 8-33: Mittels Kerbspannungskonzept bestimmte Kerbformzahlen (links) und Kerbfälle (rechts) der verschiedenen potentiellen Versagensorte in Abhängigkeit der Stirnplattendicke in Groß- und Kleinmodellen

Figure 8-33: Notch factor (left) and fatigue class (right) calculated with effective notch stress concept for the potential failure locations depending on end plate thickness in large-scale and small-scale models

Bild 8-33 zeigt die mittels Gleichung (8-13) und (8-14) ermittelten Kerbformzahlen und umgerechneten Kerbfälle der verschiedenen Details in Abhängigkeit der Stirnplattendicke. Zunächst lässt sich feststellen, dass bei den Großversuchen ab einer Stirnplattendicke von ca. 20 mm die innere Schweißnahtwurzel das kritische Detail ist. Mit steigender Stirnplattendicke nimmt die Kerbformzahl zu und die Ermüdungsfestigkeit dementsprechend ab. Dennoch liegt der berechnete Kerbfall für jede Stirnplattendicke oberhalb des Kerbfalls 40 aus der DIN EN 1993-1-9 [1].

Die Ermüdungsfestigkeit des Schweißnahtübergangs nimmt in den Großmodellen bis zu einer Stirnplattendicke von 45 mm zunächst zu, bevor eine leichte Abnahme zu verzeichnen ist. Jedoch liegt der Kerbfall immer unterhalb von Kerbfall 80 bzw. 71 der DIN EN 1993-1-9 [1]. Dies zeigt erneut, dass der Nachweis am Schweißnahtübergang sogar bei großen Stirnplattendicken unbedingt mit korrigierten Nennspannungen geführt werden sollte. Für die Kleinproben zeigt sich bei beiden Details ein ähnlicher Trend. Es fällt jedoch auf, dass die Ermüdungsfestigkeit der simulierten Großbauteile immer unterhalb derjenigen der simulierten Kleinproben liegt. Dies kann auf die durch den Steg des Profils resultierende asymmetrische Belastungssituation des Zugflanschs zurückgeführt werden. Somit sollten nicht nur Ermüdungsversuche, sondern auch Simulationen stets an Großproben durchgeführt werden, um konservative Abschätzungen der Ermüdungsfestigkeit formulieren zu können.

8.7.3.3 Einfluss des Schraubendurchmessers

Influence of bolt diameter

Ferner wurde der Schraubendurchmesser variiert. Zur Untersuchung des Einflusses auf die Schraube wird das Globalmodell herangezogen. Bild 8-34 zeigt die Spannungsschwingbreite der Schraube über die Nennspannung im Flansch, aufgetragen für verschiedene Schraubendurchmesser.

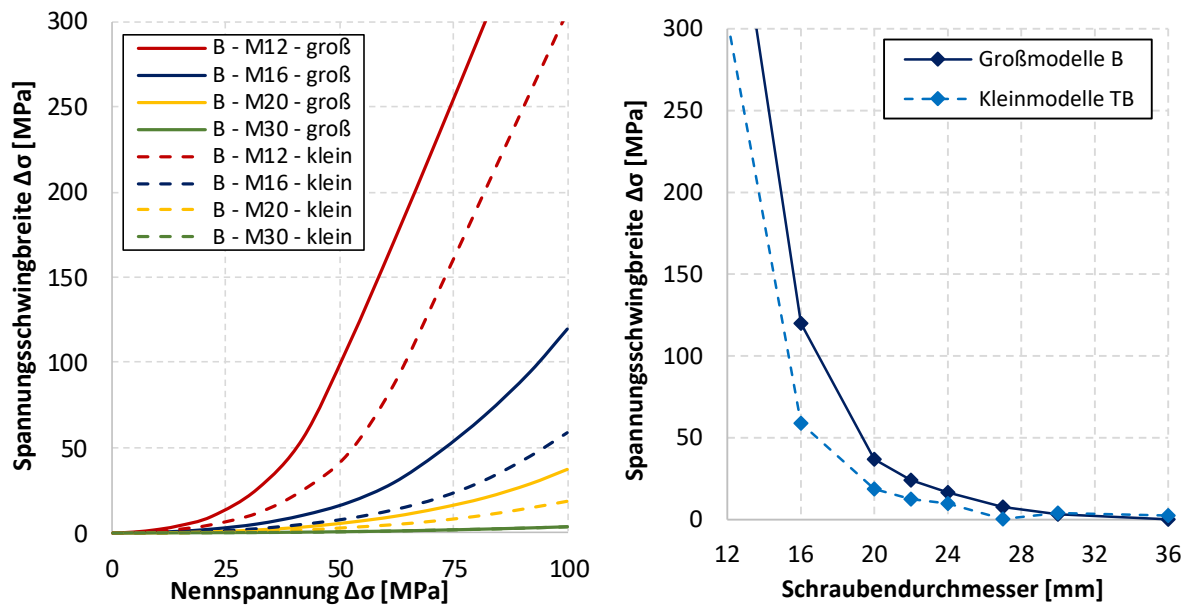


Bild 8-34: Spannungsschwingbreite der Schraube über Nennspannung im Flansch in Abhängigkeit des Schraubendurchmessers in Groß- und Kleinmodellen

Figure 8-34: Stress range in bolt over nominal stress in flange depending on bolt diameter in large-scale and small-scale models

Naturgemäß sind die Spannungsschwingbreiten bei kleinen Schraubendurchmessern sehr hoch. Dieser Trend trifft logischerweise gleichermaßen auf Groß- und Kleinmodelle zu, jedoch sind erneut die Spannungen im Kleinmodell tendenziell, vor allem bei kleinen Durchmessern, geringer. Dies kann erneut auf die asymmetrische Belastungssituation beim Großmodell zurückgeführt werden.

Die Untersuchungen zeigen vor allem, dass ein zu kleiner Schraubendurchmesser zu enorm großen Spannungsschwingbreiten in der Schraube führen kann. Die Wahl eines ausreichend großen Schraubendurchmessers ist entscheidend. Jedoch sind ab einem bestimmten Durchmesser, hier M27, keine besonders großen Spannungsreduktionen mehr zu erwarten und der Einsatz größerer Schraubendurchmesser nicht mehr wirtschaftlich.

Zur Bewertung der Spannungsschwingbreiten in der Schweißnaht wird das Kerbspannungskonzept, siehe Abschnitt 2.3.4.2, mithilfe der Submodell-Simulationen angewandt. Bild 8-35 zeigt die mittels Gleichung (8-13) und (8-14) ermittelten Kerbformzahlen und umgerechneten Kerbfälle der verschiedenen Details in Abhängigkeit des Schraubendurchmessers.

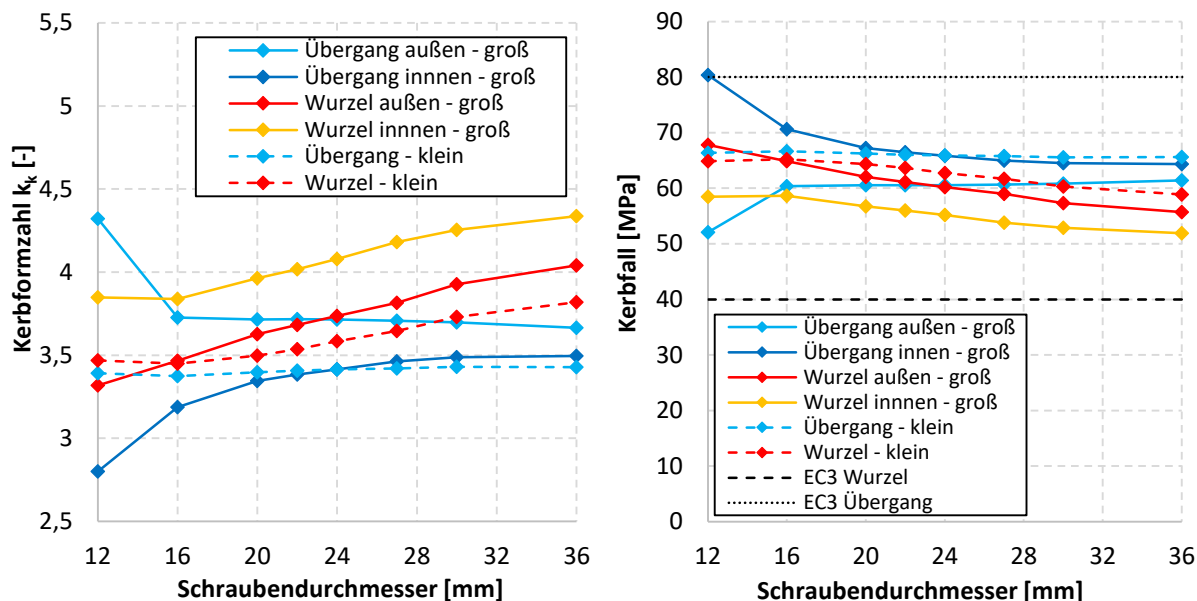


Bild 8-35: Mittels Kerbspannungskonzept bestimmte Kerbformzahlen (links) und Kerbfälle (rechts) der potentiellen Versagensorte in Abhängigkeit des Schraubendurchmessers in Groß- und Kleinmodellen

Figure 8-35: Notch factor (left) and fatigue class (right) calculated with effective notch stress concept for the potential failure locations depending on bolt diameter in large-scale and small-scale models

Zunächst lässt sich feststellen, dass bei den Großversuchen ab einem Durchmesser von M16 erneut die innere Schweißnahtwurzel das kritischste Detail ist. Mit steigendem Durchmesser nimmt die Kerbformzahl leicht zu und die Ermüdungsfestigkeit dementsprechend leicht ab. Dennoch liegt der berechnete Kerbfall für jede Stirnplattendicke oberhalb des Kerbfalls 40 aus der DIN EN 1993-1-9 [1]. Die Ermüdungsfestigkeit des Schweißnahtübergangs nimmt tendenziell ebenfalls mit zunehmendem Schraubendurchmesser ab. Jedoch liegt der Kerbfall immer unterhalb von Kerbfall 80 der DIN EN 1993-1-9 [1]. Dies zeigt erneut, dass der Ermüdungsnachweis am Schweißnahtübergang unbedingt mit korrigierten Nennspannungen geführt werden sollte. Für die Kleinproben zeigt sich bei beiden Details ein ähnlicher Trend. Es fällt jedoch auf, dass die Ermüdungsfestigkeit der simulierten Großbauteile immer unterhalb derjenigen der simulierten Kleinproben liegt. Dies kann auf die durch den Steg des Profils resultierende asymmetrische Belastungssituation des Zugflanschs zurückgeführt werden. Somit sollten nicht nur Ermüdungsversuche, sondern auch Simulationen stets an Großproben durchgeführt werden, um konservative Abschätzungen der Ermüdungsfestigkeit formulieren zu können.

8.7.3.4 Einfluss des Lochabstandes

Influence of bolt distances

Des Weiteren wurde der Lochabstand der Schrauben in vertikaler und horizontaler Richtung variiert. Zur Untersuchung des Einflusses auf die Schraube wird das Globalmodell herangezogen. Der Einfluss des horizontalen Schraubenabstandes wird ausschließlich anhand der Großmodelle untersucht, da das Kleinmodell lediglich eine Schraube in horizontaler Richtung besitzt.

Bild 8-36 zeigt die Spannungsschwingbreite der Schraube über die Nennspannung im Flansch aufgetragen für verschiedene horizontale Lochabstände der Großmodelle. Anhand der Spannungsverläufe ist kein signifikanter Trend zu erkennen.

Experimentelle Untersuchungen zum Stirnplattenstoß mit vorgespannten Schrauben

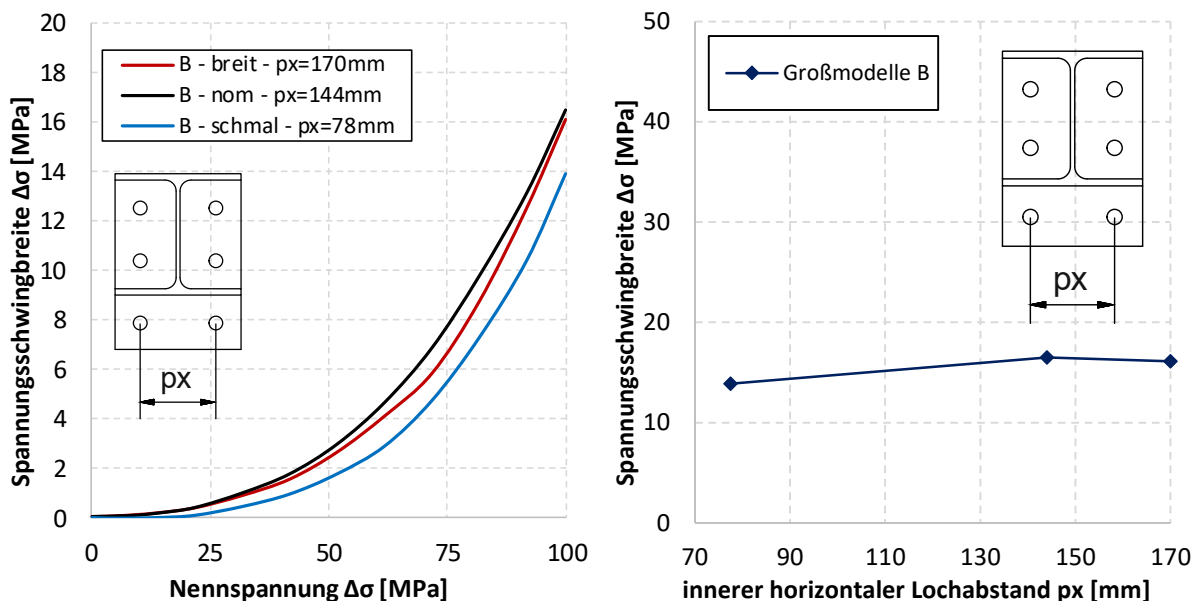


Bild 8-36: Spannungsschwingbreite der Schraube über Nennspannung im Flansch in Abhängigkeit des horizontalen Lochabstands in Großmodellen

Figure 8-36: Stress range in bolt over nominal stress in flange depending on horizontal bolt distance in large-scale models

Zur Bewertung der Spannungsschwingbreiten in der Schweißnaht wird das Kerbspannungskonzept, siehe Abschnitt 2.3.4.2, mithilfe der Submodell-Simulationen angewandt. Bild 8-37 zeigt die mittels Gleichung (8-13) und (8-14) ermittelten Kerbformzahlen und umgerechneten Kerbfälle der verschiedenen Details in Abhängigkeit des horizontalen Lochabstandes. Zunächst lässt sich feststellen, dass bei den Großversuchen allenfalls die innere Schweißnahtwurzel das kritische Detail ist. Jegliche Abweichung des nominalen horizontalen Schraubenabstandes führt zu geringen Ermüdungsfestigkeiten. Dennoch liegt der berechnete Kerbfall für jeden Lochabstand oberhalb des Kerbfalles 40 aus der DIN EN 1993-1-9 [1].

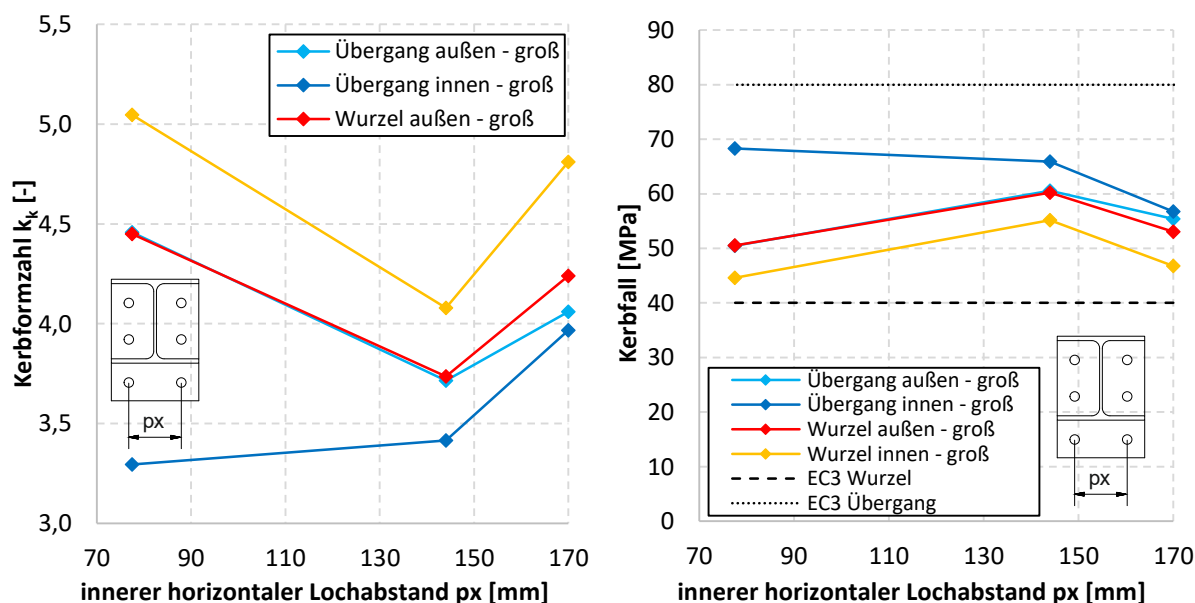


Bild 8-37: Mittels Kerbspannungskonzept bestimmte Kerbformzahlen (links) und Kerbfälle (rechts) der verschiedenen potentiellen Versagensorte in Abhängigkeit des horizontalen Lochabstands in Großmodellen

Figure 8-37: Notch factor (left) and fatigue class (right) calculated with effective notch stress concept for the potential failure locations depending on horizontal bolt distance in large-scale models

Die Ermüdungsfestigkeit des Schweißnahtübergangs zeigt zumindest für breite horizontale Schraubenabstände den gleichen Trend. Jedoch liegt der Kerbfall immer unterhalb von Kerbfall 80 der DIN EN 1993-1-9 [1]. Dies zeigt wiederholt, dass der Ermüdungsnachweis des Schweißnahtübergangs unbedingt mit korrigierten Nennspannungen geführt werden sollte.

Ferner wurde der Lochabstand der Schrauben in vertikaler Richtung variiert. Zur Untersuchung des Einflusses auf die Schraube wird das Globalmodell der Groß- und Kleinbauteile herangezogen. Bild 8-38 zeigt die Spannungsschwingbreite der Schraube über die Nennspannung im Flansch, aufgetragen für verschiedene vertikale Lochabstände der Großmodelle. Erwartungsgemäß steigen die Spannungsschwingbreiten in der Schraube mit zunehmendem vertikalem Lochabstand. Dieser Trend trifft logischerweise gleichermaßen auf Groß- und Kleinmodelle zu, jedoch sind erneut die Spannungen im Kleinmodell durchgehend geringer. Dies kann erneut auf die asymmetrische Belastungssituation beim Großmodell zurückgeführt werden.

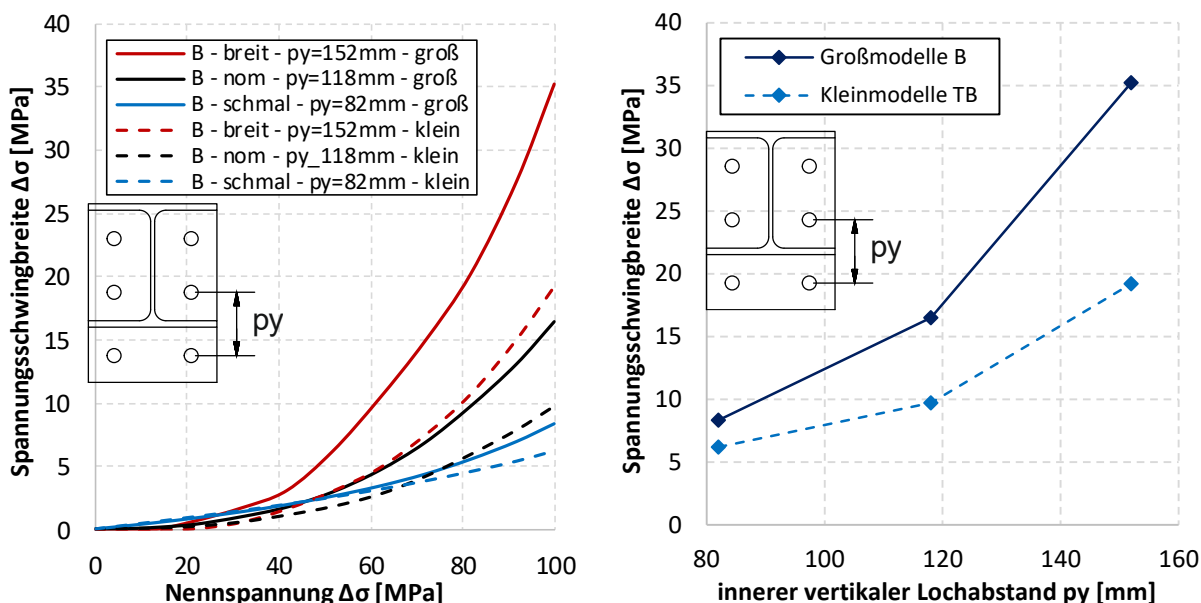


Bild 8-38: Spannungsschwingbreite der Schraube über Nennspannung im Flansch in Abhängigkeit des vertikalen Lochabstands in Groß- und Kleinmodellen

Figure 8-38: Stress range in bolt over nominal stress in flange depending on vertical bolt distance in large-scale and small-scale models

Zur Bewertung der Spannungsschwingbreiten in der Schweißnaht wird das Kerbspannungskonzept, siehe Abschnitt 2.3.4.2, mithilfe der Submodell-Simulationen angewandt. Bild 8-39 zeigt die mittels Gleichung (8-13) und (8-14) ermittelten Kerbformzahlen und umgerechneten Kerbfälle der verschiedenen Details in Abhängigkeit des vertikalen Lochabstandes. Zunächst lässt sich feststellen, dass bei den Großversuchen allenfalls die innere Schweißnahtwurzel das kritische Detail ist. Mit zunehmendem vertikalem Lochabstand steigt die Ermüdungsfestigkeit. Der berechnete Kerbfall liegt für jeden Lochabstand oberhalb des Kerbfalls 40 aus der DIN EN 1993-1-9 [1]. Die Ermüdungsfestigkeit des Schweißnahtübergangs zeigt einen ähnlichen Trend, wobei die Ermüdungsfestigkeit des äußeren Schweißnahtübergangs weniger Abhängigkeit vom vertikalen Lochabstand aufweist. Jedoch liegt der Kerbfall immer unterhalb von Kerbfall 80 der DIN EN 1993-1-9 [1]. Dies zeigt wiederholt, dass der Nachweis am Schweißnahtübergang unbedingt mit korrigierten Nennspannungen geführt werden sollte.

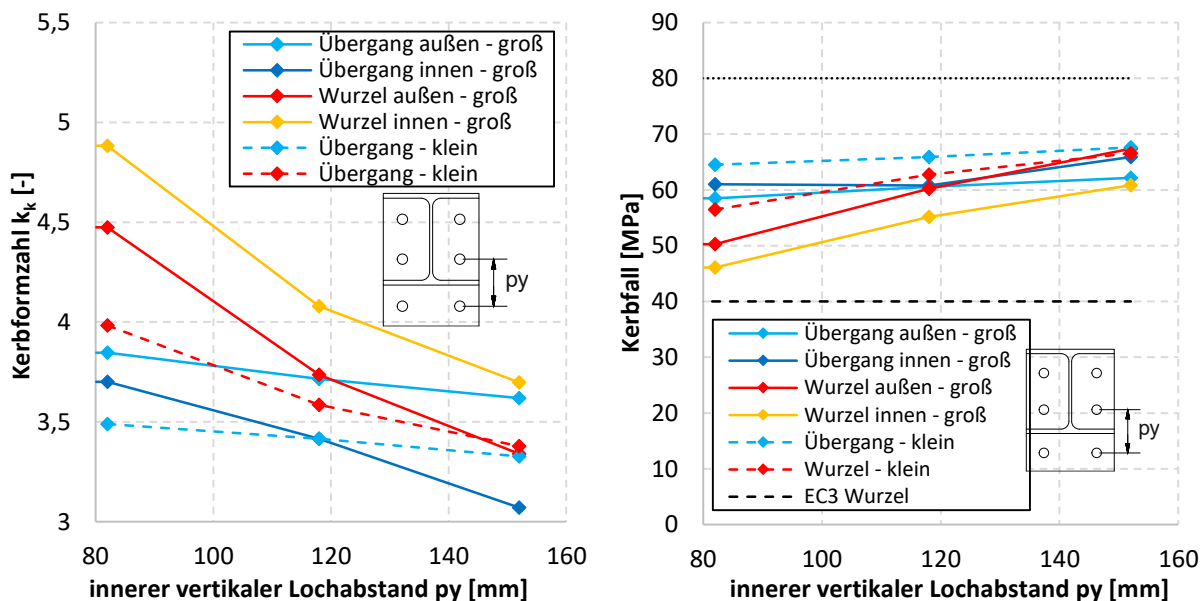


Bild 8-39: Mittels Kerbspannungskonzept bestimmte Kerbfornzahlen (links) und Kerbfälle (rechts) der verschiedenen Versagensorte in Abhängigkeit des vertikalen Lochabstands in Groß- und Kleinmodellen

Figure 8-39: Notch factor (left) and fatigue class (right) calculated with effective notch stress concept for the potential failure locations depending on vertical bolt distance in large-scale and small-scale models

Für die Kleinmodelle zeigen sich ähnliche Trends, wobei die Großmodelle für große vertikale Schraubenabstände (abweichender Weise zu Resultaten aus Abschnitt 8.7.3.2 und 8.7.3.3) höhere Ermüdungsfestigkeiten aufweisen.

8.7.3.5 Einfluss des Profils

Influence of section

Ferner wurde das Trägerprofil variiert. Zur Untersuchung des Einflusses auf die Schraube wird das Globalmodell herangezogen.

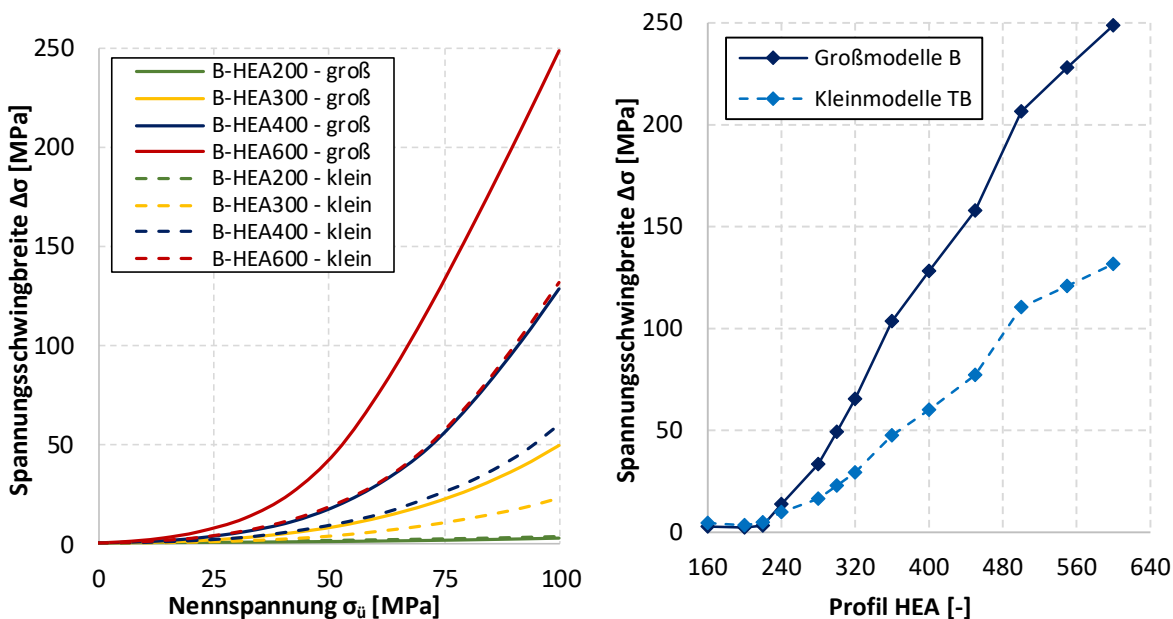


Bild 8-40: Spannungsschwingbreite der Schraube über Nennspannung im Flansch in Abhängigkeit der Profilgröße in Groß- und Kleinmodellen

Figure 8-40: Stress range in bolt over nominal stress in flange depending on section size in large-scale and small-scale models

Bild 8-40 zeigt die Spannungsschwingbreite der Schraube über die Nennspannung im Flansch, aufgetragen für verschiedene Profile der HEA Reihe in Groß- sowie Kleinmodellen. Hierbei ist zu beachten, dass die Nennspannungsschwingbreite im Flansch konstant 100 MPa beträgt. Bei größeren Profilen steigen also die äußeren Kräfte an. Dies hat zur Folge, dass die Schraube, die stets die gleiche Größe hat, naturgemäß stärker beansprucht wird. Durch die größere äußere Kraft in den Modellen der tragfähigeren Profilen (z.B. HEA600) steigt erwartungsgemäß auch die Beanspruchung der Schraube. Erneut werden die Schrauben der Großmodelle stärker beansprucht als diejenigen der Kleinmodelle.

Zur Bewertung der Spannungsschwingbreiten in der Schweißnaht wird das Kerbspannungskonzept, siehe Abschnitt 2.3.4.2, mithilfe der Submodell-Simulationen angewandt. Bild 8-41 zeigt die mittels Gleichung (8-13) und (8-14) ermittelten Kerbformzahlen und umgerechneten Kerbfälle der verschiedenen Details in Abhängigkeit des Profils. Zunächst lässt sich feststellen, dass bei den Großversuchen bis zum Profil HEA450 die innere Schweißnahtwurzel das kritische Detail ist. Der berechnete Kerbfall liegt bei allen Profilen, bis auf HEA600 oberhalb des Kerbfalls 40 aus der DIN EN 1993-1-9 [1]. Ab Profil HEA450 wird der äußere Schweißnahtübergang maßgebend. Diese Trends lassen sich damit erklären, dass für größere Profile auch die Stirnplatte größer wird. Selbst bei einem HEA600 werden bei der betrachteten Konfiguration jedoch nur 3 Schraubenreihen eingesetzt. Durch die gleichzeitig höheren äußeren Kräfte erfährt die Stirnplatte eine große Verformbarkeit, die sich negativ auf die Ermüdungsfestigkeit aller Details auswirkt. Die Kerbfälle der Schweißnahtübergänge liegen immer unterhalb von Kerbfall 80 der DIN EN 1993-1-9 [1]. Dies zeigt wiederholt, dass der Nachweis am Schweißnahtübergang unbedingt mit korrigierten Nennspannungen geführt werden sollte.

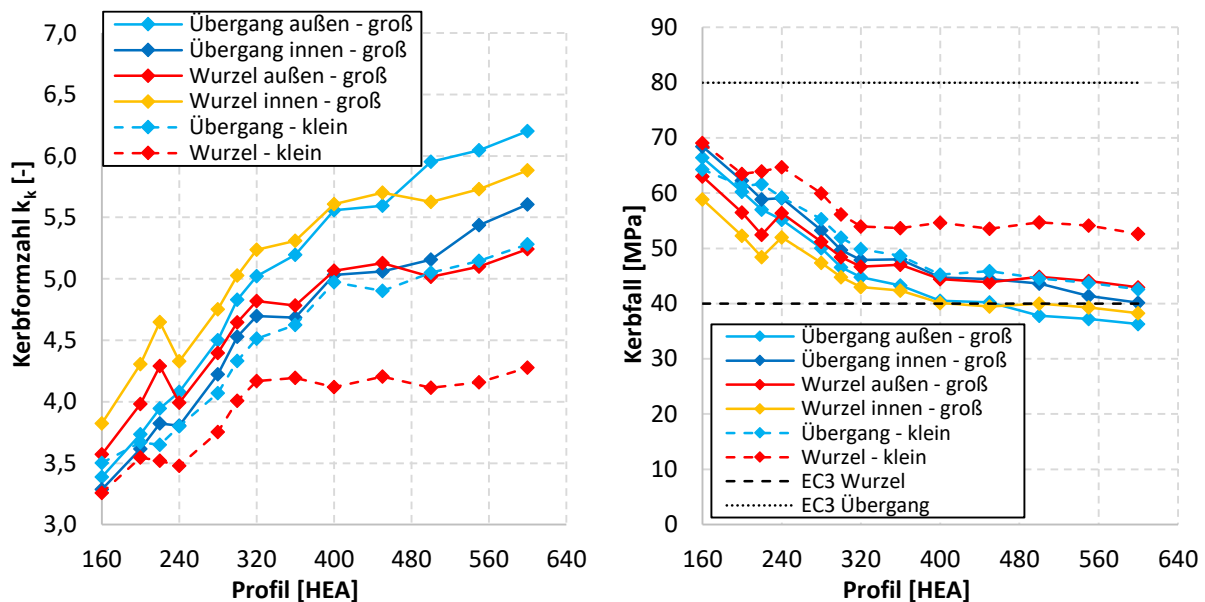


Bild 8-41: Mittels Kerbspannungskonzept bestimmte Kerbformzahlen (links) und Kerbfälle (rechts) der potentiellen Versagensorte in Abhängigkeit der Profilgröße in Groß- und Kleinmodellen

Figure 8-41: Notch factor (left) and fatigue class (right) calculated with effective notch stress concept for the potential failure locations depending on section size in large-scale and small-scale models

Erneut lässt sich erkennen, dass die Ermüdungsfestigkeit der simulierten Großbauteile immer unterhalb derjenigen der simulierten Kleinproben liegt. Dies kann auf die durch den Steg des Profils resultierende asymmetrische Belastungssituation des Zugflanschs zurückgeführt werden.

8.7.3.6 Einfluss der typisierten Verbindungen unterschiedlicher Dimension

Influence of standardized connections of different dimensions

Um den Maßstabeffekt anhand realistischer, praxisrelevanter Verbindungen untersuchen zu können, wurden typisierte Stirnplattenverbindungen [124] numerisch analysiert. Zur Untersuchung des Einflusses auf die Schraube wird das Globalmodell herangezogen. Erneut wird für die Spannungsschwingbreite im Flansch konstant 100 MPa angesetzt, sodass tragfähigere Verbindungen größerer Profile durch größere Kräfte beansprucht werden. Anders als in der Untersuchungen aus Abschnitt 8.7.3.5 werden jedoch auch andere Abmessungen variiert, je nachdem, welche Größen in der typisierten Verbindung vorgesehen sind. So sind bei Verbindungen mit größeren Profilen auch dickere Stirnplatten und Schrauben mit größerem Durchmesser vorhanden.

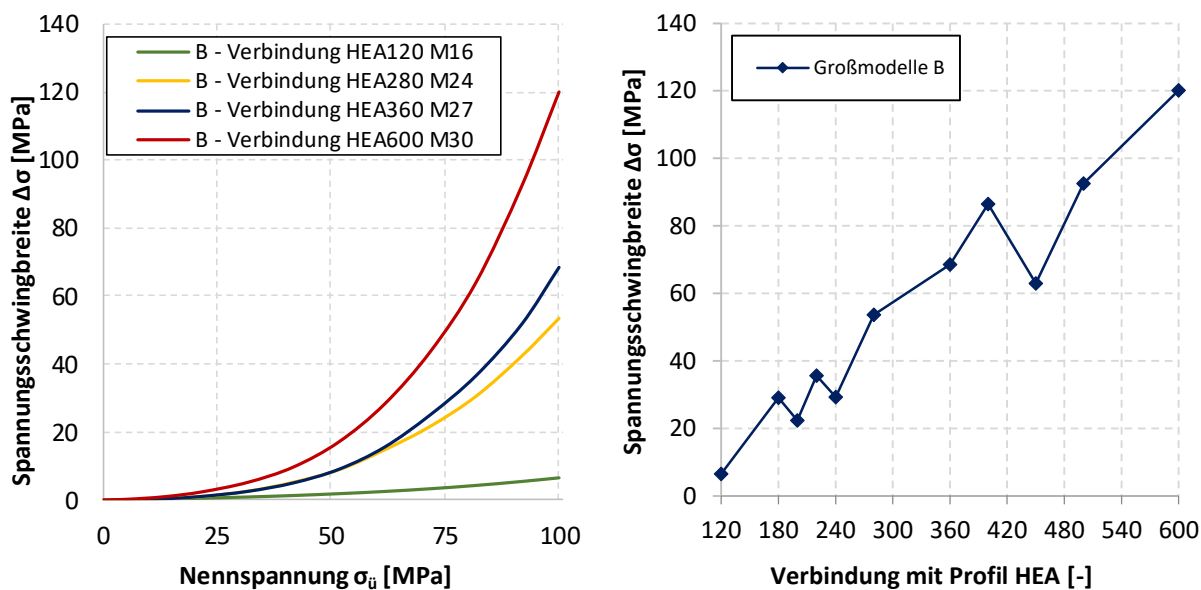


Bild 8-42: Spannungsschwingbreite der Schraube über die Nennspannung im Flansch in Abhängigkeit der Dimension der Verbindung in Großmodellen

Figure 8-42: Stress range in bolt over nominal stress in flange depending on dimension of the connection in large-scale models

Bild 8-42 zeigt die Spannungsschwingbreite der Schraube über die Nennspannung im Flansch, aufgetragen für verschiedene Verbindungen mit HEA-Profil in Großmodellen. Mit steigender Dimension der Verbindung steigt erwartungsgemäß die Beanspruchung der Schraube.

Anhand der typisierten Verbindungen wurde ebenfalls beispielhaft die Aussagekraft von Schraubenkraftmodellen (siehe Abschnitt 8.2.2) im Hinblick auf Stirnplattenverbindungen untersucht. Bild 8-43 zeigt die Prognose des Schraubenkraftmodells nach Petersen [126] zusammen mit den Ergebnissen der Simulationen für eine Verbindung mit einem HEA360 und zwei verschiedenen Schraubendurchmessern. Für eine Verbindung mit M27 Schrauben ist die Prognose konservativ, während sie bei (für die Verbindung vergleichsmäßig) kleinen Schrauben M24 die simulierten Schraubenkräfte unterschätzt. Hierzu ist zu erwähnen, dass die analytischen Modelle auf der Geometrie eines L- oder T-Stoßes basieren und aus diesem Grund naturgemäß aufgrund der zusätzlichen Beeinflussung durch den Steg nicht in jedem Fall auf Stirnplattenverbindungen übertragbar sein können.

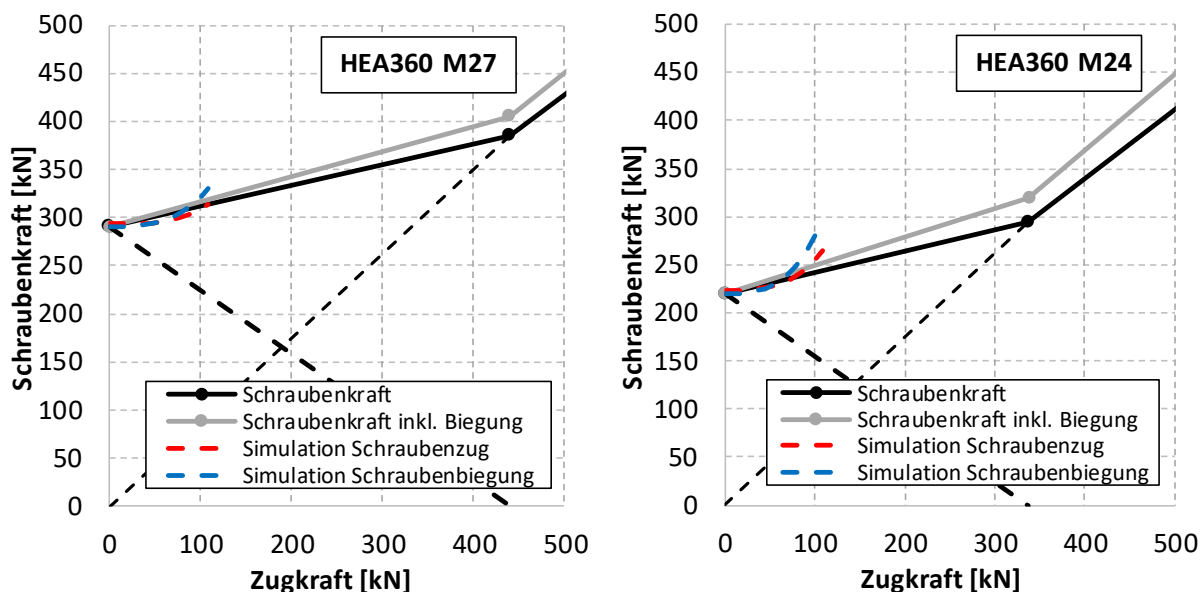


Bild 8-43: Prognose der Schraubkraft anhand vom Modell nach Petersen und numerischen Simulationen der Großmodelle

Figure 8-43: Prognosis of bolt force based on Petersen model and numerical simulations of large-scale models

Zur Bewertung der Spannungsschwingbreiten in der Schweißnaht wird das Kerbspannungskonzept, siehe Abschnitt 2.3.4.2, mithilfe der Submodell-Simulationen angewandt. Bild 8-44 zeigt die mittels Gleichung (8-13) und (8-14) ermittelten Kerbformzahlen und umgerechneten Kerbfälle der verschiedenen Details in Abhängigkeit der Dimension der Verbindung.

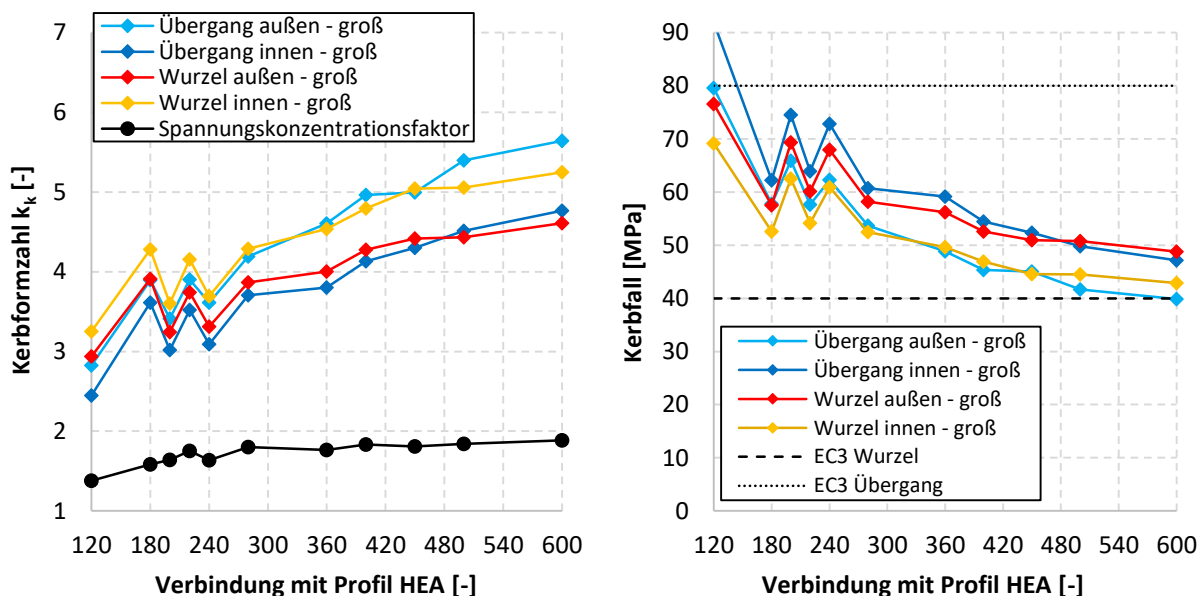


Bild 8-44: Mittels Kerbspannungskonzept bestimmte Kerbformzahlen (links) und Kerbfälle (rechts) der potentiellen Versagensorte in Abhängigkeit der Profilgröße in Großmodellen

Figure 8-44: Notch factor (left) and fatigue class (right) calculated with effective notch stress concept for the potential failure locations depending on dimension of the connection in large-scale models

Zunächst lässt sich feststellen, dass bis zu einer Verbindung mit dem Profil HEA300 die innere Schweißnahtwurzel das kritische Detail ist. Der berechnete Kerbfall liegt bei allen Verbindungen oberhalb des Kerbfalls 40 aus der DIN EN 1993-1-9 [1]. Ab Profil HEA300

wird der äußere Schweißnahtübergang maßgebend. Diese Trends lassen sich damit erklären, dass für größere Profile auch die Stirnplatte größer wird. Selbst bei einer Verbindung mit einem HEA600 werden bei der betrachteten Konfiguration jedoch nur 3 Schraubenreihen eingesetzt. Durch die gleichzeitig höhere äußere Belastung erfährt die Stirnplatte eine große Verformbarkeit, die sich negativ auf die Ermüdungsfestigkeit aller Details auswirkt. Für größere Profile sollte also eine weitere Schraubenreihe zum Einsatz kommen. Die Kerbfälle der Schweißnahtübergänge liegen bei allen Verbindungen, außer der kleinsten mit einem HEA120, immer unterhalb von Kerbfall 80 der DIN EN 1993-1-9 [1]. Dies zeigt wiederholt, dass der Nachweis am Schweißnahtübergang unbedingt mit korrigierten Nennspannungen geführt werden sollte.

Der Spannungskonzentrationsfaktor k_f (siehe Abschnitt 2.3.2.3), welcher das Verhältnis zwischen Nennspannung und korrigierter Nennspannung beschreibt, wurde ebenfalls für die verschiedenen praxisrelevanten Verbindungen anhand der Globalmodelle ausgewertet, siehe Bild 8-44 links. Auch hier lassen sich für größeren Verbindungen höhere Spannungskonzentrationen feststellen. Der Spannungskonzentrationsfaktor nimmt Werte zwischen 1,4 und 2 an.

8.8 Fazit und Kerbfallempfehlungen

Conclusion and fatigue class recommendation

Auf Basis der in Abschnitt 8.7.3 vorgestellten allgemeinen Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten der Stirnplattenverbindung mit vorgespannten Schrauben lassen sich in Kombination mit den experimentellen Ergebnissen aus Abschnitt 8.6 sich einige Bemessungsempfehlungen ableiten:

- a) Eine Verbindung mit bündiger Stirnplatte im Zugbereich ist aufgrund großer Beanspruchung der Schrauben nicht zu empfehlen.
- b) Die Dimensionen der Verbindung sollten sich an typisierten Verbindungen orientieren.
- c) Der Schraubendurchmesser sollte möglichst groß gewählt werden.
- d) Die Stirnplattendicke darf nicht zu klein gewählt werden. Folgende Relation wird empfohlen: $t_{\text{stirnplatte}} > \varnothing_{\text{schraube}}$.
- e) In vertikaler Richtung sollten die Schrauben so nah wie möglich am Zugflansch positioniert werden. Die Schraubenabstände in horizontaler Richtung sollten sich an typisierten Verbindungsempfehlungen orientieren.
- f) Zur Abschätzung der Schraubenspannungen können analytische Modelle nur eingeschränkt herangezogen werden. Es wird die genauere Ermittlung der Schraubenspannung mittels numerischer Simulationen empfohlen.
- g) Für den Nachweis des Schweißnahtübergangs müssen korrigierte Nennspannungen verwendet werden. Konservativ kann ein Spannungskonzentrationsfaktor von 2,0 angesetzt werden. (Bei der Auswertung der Versuche ergab sich mit der Berechnung korrigierter Nennspannungen ein Kerbfall von 102,9. Kerbfall 80, wie derzeit in EN1993-1-9 [1] verankert, liegt somit deutlich auf der sicheren Seite)
- h) Im Zugbereich durchgeschweißte Stirnplattenstöße sind zu empfehlen, da das kritischere Kerbdetail der Schweißnahtwurzel entfällt.
- i) Ab einer Profilgröße von HEA300 sollten vier oder mehr Schraubenreihen angesetzt werden.
- j) Kleinmodelle in Form von T- oder L-Stößen decken weder experimentell noch numerisch das Ermüdungsverhalten der Stirnplattenverbindung ab.

Tabelle 8-7 zeigt den Vorschlag einer Kerbfalltabelle für die Details des Schweißnahtübergangs und der Schweißnahtwurzel am Zugflansch eines Stirnplattenstoßes mit vorgespannten Schrauben. Hier wird von einem durchgeschweißtem Steg und Druckflansch ausgegangen, da Varianten mit nicht durchgeschweißten Nähten an diesen Stellen bisher nicht untersucht wurden. Die vorgespannte Schraube selbst wird gemäß Detail 14 in Tabelle 8.1 [1] nachgewiesen.

Tabelle 8-7: Kerbfallvorschlag Stirnplattenverbindung mit vorgespannten Schrauben in Tabelle 8.5

Table 8-7: Detail suggestion for endplate connection with prestressed bolts in table 8.5

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80	<p>$l \leq 50mm$ $h \leq 300mm$</p> <p>⑬</p>		<p><u>Stirnplattenverbindungen mit überstehender Stirnplatte, doppelsymmetrischem I-Profil und 3 Schraubenreihen:</u></p> <p>⑬: Riss am Schweißnahtübergang in voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten am Zugflansch (Unterflansch)</p>	<p>⑬: $\Delta\sigma$ ist mit korrigierten Nennspannungen^{a)} zu ermitteln.</p> <p>⑭: Es ist zusätzlich Detail 8 Tabelle 8.5 nachzuweisen.</p> <p><u>Kerbfälle ⑬ und ⑭:</u> Voll durchgeschweißte Stumpfnah am Steg und Druckflansch (Oberflansch). Es dürfen nur vorgespannte Schrauben nach EN 1993-1-8 und EN 1090-2 verwendet werden. Der Nachweis der Schraube erfolgt nach Detail 14 Tabelle 8.1. Die Positionierung der unteren zwei Schraubenreihen erfolgt möglichst nah am Zugflansch (Unterflansch).</p>
40	<p>$h \leq 300mm$</p> <p>⑭</p>		<p>⑭: Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten Nähten oder Kehlnähten am Zugflansch (Unterflansch)</p>	<p>⑭: Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten Nähten oder Kehlnähten am Zugflansch (Unterflansch)</p>

^{a)} Konservative Abschätzung: $k_f = 2,0$

9 Bewertung wichtiger Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit

Evaluation of important influences on fatigue strength

In diesem Abschnitt wird die Bewertung wichtiger Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit erläutert. Im Fokus stehen hier der Maßstabeffekt, der Mittelspannungseinfluss, der Bauteileinfluss, der Streckgrenzeinfluss, sowie Fertigungseinflüsse und weitere detailspezifische Einflussgrößen. Hierbei wird nur auf relevante Ergebnisse der Auswertung eingegangen.

This section explains the evaluation of important influences on the fatigue strength. The focus here is on the scale effect, the medium stress influence, the component influence, the yield strength influence, as well as manufacturing influences and other detail-specific influencing variables. Only the relevant results of the evaluation are discussed here.

9.1 Allgemein

General

Wie in Abschnitt 2.4 erläutert, existiert eine Vielzahl an Einflüssen auf die Ermüdungsfestigkeit. In diesem Kapitel wird lediglich auf die Einflussgrößen und Details eingegangen, deren Tendenzen von Relevanz sind. Aufgrund der zahlreichen Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit eines Details, stellen sich die Trends einzelner Eigenschaften nicht immer als signifikant heraus. Das Vorgehen zur Ermittlung der Werte der mittleren Ermüdungsfestigkeit wurde in Abschnitt 3.6 erläutert.

9.2 Bauteileinfluss und Größeneinfluss

Component influence and size effect

9.2.1 Übersicht

Overview

In diesem Abschnitt werden Untersuchungen zum Einfluss des Bauteilmaßstabs auf die Ermüdungsfestigkeit vorgestellt. Zu Details der Tabelle 8.1 bis 8.7 wurden Geometrieinflüsse überprüft. Bei den Details der Tabelle 8.8 bis 8.10 konnte anhand der vorhandenen Daten kein signifikanter Maßstabseffekt festgestellt werden.

9.2.2 Details der Tabelle 8.1

Details of Table 8.1

Laut aktuellem Kerbfallkatalog [1] besitzt in Tabelle 8.1 lediglich die Schraube, Detail 14, einen zu berücksichtigenden Größeneffekt. Auch anhand der vorliegenden Untersuchungen konnte auf Basis der vorhandenen Daten bei den übrigen ungeschweißten Details kein Geometrieinfluss festgestellt werden.

Bild 9-1 zeigt die Darstellung der mittleren Ermüdungsfestigkeit in Abhängigkeit des Schraubendurchmessers. Die Versuchsdaten weisen im Mittel auf eine leicht abneh-

mende Ermüdungsfestigkeit mit zunehmenden Schraubendurchmesser hin. Dies entspricht ebenfalls der Regelung der DIN EN 1993-1-9 [1]. Hierbei ist zu beachten, dass die Datenbasis und die Streuung im kleineren Durchmesserbereich deutlich größer sind.

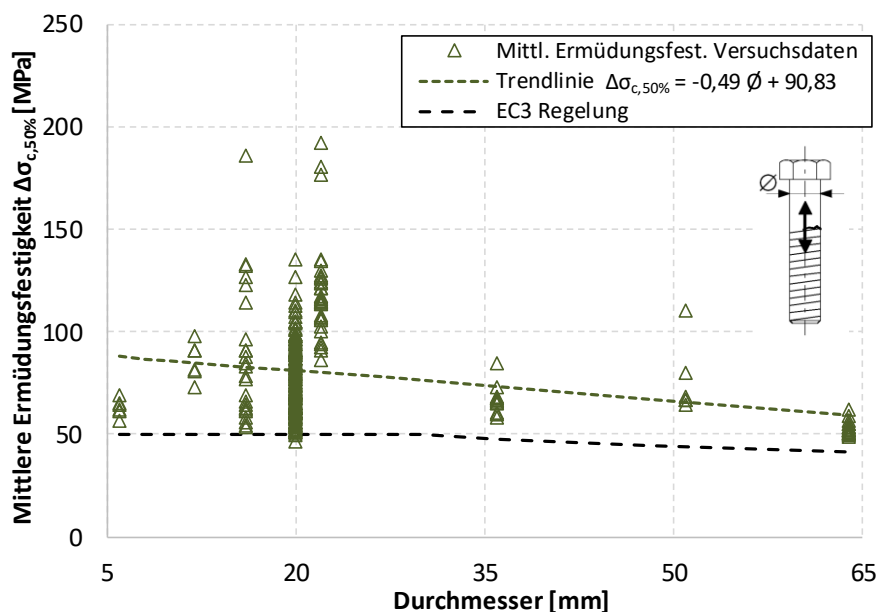


Bild 9-1: Untersuchung des Durchmesserereinflusses des Details 14 der Tabelle 8.1

Figure 9-1: Investigation of the diameter influence of detail 14 of Table 8.1

Bei Betrachtung der unteren Werte jeden Durchmessers zeigt sich kein eindeutiger Trend.

9.2.3 Details der Tabelle 8.2

Details of table 8.2

In Versuchsserien zu Längsnähten der Tabelle 8.2 wurden unterschiedliche Bauteile untersucht. Dies betrifft insbesondere die automatisch hergestellten Nähte ohne (Detail 2) und mit Ansatzstellen (Detail 3), sowie handgeschweißte Nähte (Detail 5). Hier wurden Großbauteile in Form von I-Profilen unter Biegebeanspruchung untersucht. Deren Ermüdungsfestigkeit kann jener von Kleinbauteilen gegenübergestellt werden, die aus einem T-Profil bestehen, das den Zugbereich des Profils darstellt. Diese Probekörper wurden unter reiner Zugbelastung getestet. Bild 9-2 zeigt die Untersuchung des Bauteileinflusses anhand Detail 2 und Detail 5. Während im Fall von Detail 2 die Großbauteile eine geringere Ermüdungsfestigkeit aufweisen, zeigt sich bei Detail 5 ein gegensätzlicher Trend. Denn die Belastung und das Versagenskriterium spielen beim Vergleich des Bauteilmaßstabs eine große Rolle: Das Risswachstum kann in Kleinproben durch die ausschließliche Zugbeanspruchung schneller verlaufen und ein vollständiger Bruch der Probe ist vergleichsweise früh erreicht. Bei Großbauteilen verläuft das Risswachstum hingegen durch die Biegebeanspruchung etwas langsamer und ein kompletter Bruch entsteht vergleichsweise später. Ein Bauteileinfluss, bei dem Großbauteile eine geringere Ermüdungsfestigkeit aufweisen, zeigt sich eher, wenn als Versagenskriterium der erste Anriss definiert ist. Wird der vollständige Bruch als Versuchsende festgelegt, so kann sich u.U. ein gegensätzlicher Trend ergeben.

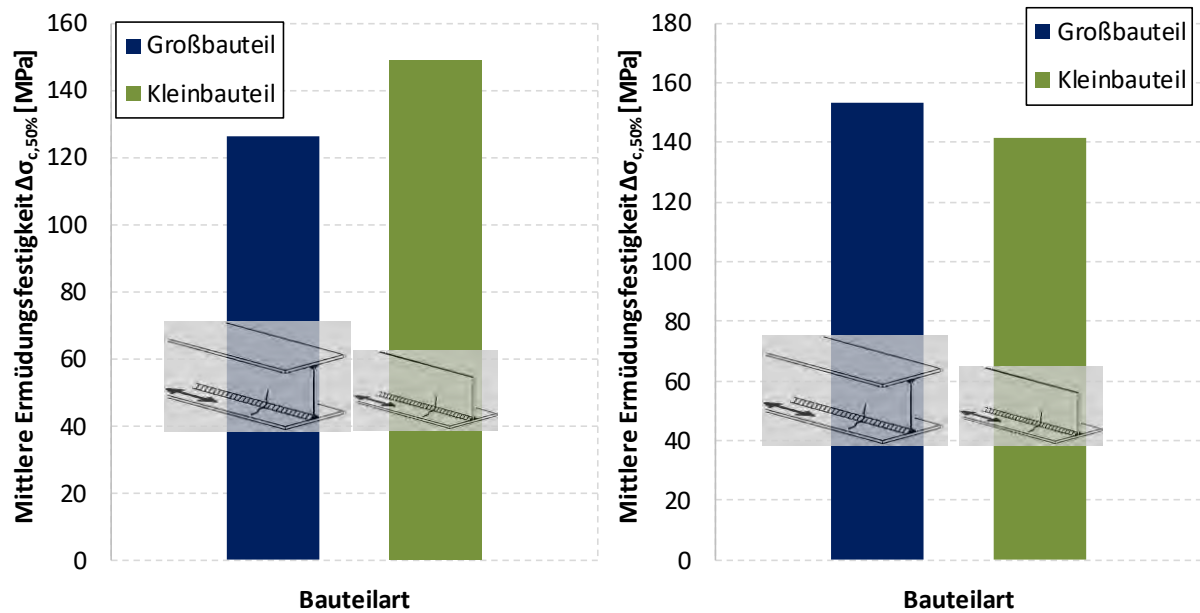


Bild 9-2: Untersuchung des Bauteileinflusses des Details 2 (links) und Detail 5 (rechts) der Tabelle 8.2

Figure 9-2: Investigation of the component influence of detail 2 (left) and detail 5 (right) of Table 8.2

9.2.4 Details der Tabelle 8.3

Details of Table 8.3

9.2.4.1 Blechdickeneinflüsse bei Stumpfstößen

Plate thickness effect of butt welds

DIN EN 1993-1-9 [1] gibt für Blechdicken größer 25 mm einen Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Blechdickeneinflusses vor. Die experimentellen Versuchsergebnisse in diesem Kapitel werden in Abhängigkeit von der Blechdicke der Proben betrachtet. Um den Einfluss der Blechdicke auf die Ermüdungsfestigkeit überprüfen zu können, liegen ausreichend Daten für die beidseitig geschweißte und kerbfrei bearbeiteten Stumpfnäht, sowie für im Schweißzustand belassene Stumpfnähte vor, vgl. Bild 9-3 (a) und (b). Entsprechend [36] und [16] müsste der Blechdickeneinfluss für das im Schweißzustand belassene Detail deutlich ausgeprägter sein.

Es werden ausschließlich Versuche berücksichtigt, die mit einer konstanten Amplitude und im Zugschwellbereich durchgeführt wurden. Außerdem wurden Versuchsergebnisse, die nachweislich von einem Defekt in der Schweißnaht herrührten, nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche werden in Abhängigkeit der Blechdicke in einer auf 2 Millionen Schwingspiele normierten Spannungsschwingbreite angegeben.

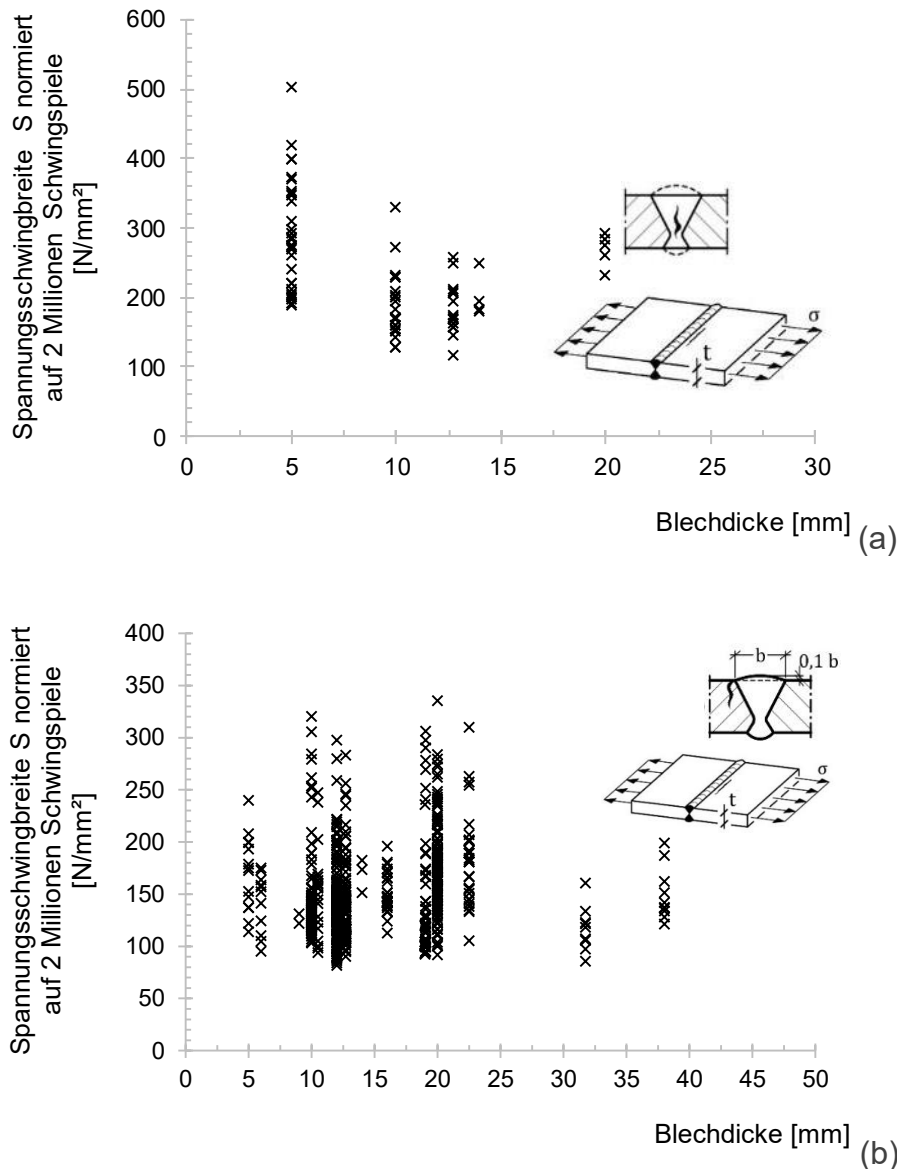


Bild 9-3: Blechdickeneinfluss an experimentellen Untersuchungen für kerbfrei bearbeitete Stumpfstoße (a) und im Schweißzustand belassene Stumpfstoße (b)

Figure 9-3: Plate thickness effect on experimental data for butt welds ground flush (a) and as welded butt welds (b)

Keines der in Bild 9-3 dargestellten Konstruktionsdetails weist einen signifikanten Blechdickeneinfluss auf. Dieser müsste theoretisch für kleiner werdende Blechdicken einen immer größeren Einfluss entfalten. Die in DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIV-Empfehlungen [16] vorgeschlagene Blechdickenkorrektur greift erst bei einer Blechdicke von 25 mm. In diesem Bereich sind jedoch nur wenige experimentellen Daten bekannt. Zusätzliche experimentelle Untersuchungen im Dickblechbereich sind also dringend notwendig um den Einfluss beurteilen zu können.

Eine Bewertung der Blechdicke mithilfe des Kerbspannungskonzepts ist in Anhang 27 gegeben. Im Gegensatz zu den experimentellen Untersuchungen zeigt die Simulation eine deutliche Dickenabhängigkeit.

In Bild 9-4 sind die gefilterten experimentellen Versuchsergebnisse für das Detail: „Stumpfstoß, im Schweißzustand belassen“ zusammen mit dem von DIN EN 1993-1-9 [1]

vorgegebenen Verlauf, unter Berücksichtigung des Blechdickeneinflusses und den FE Ergebnissen, dargestellt.

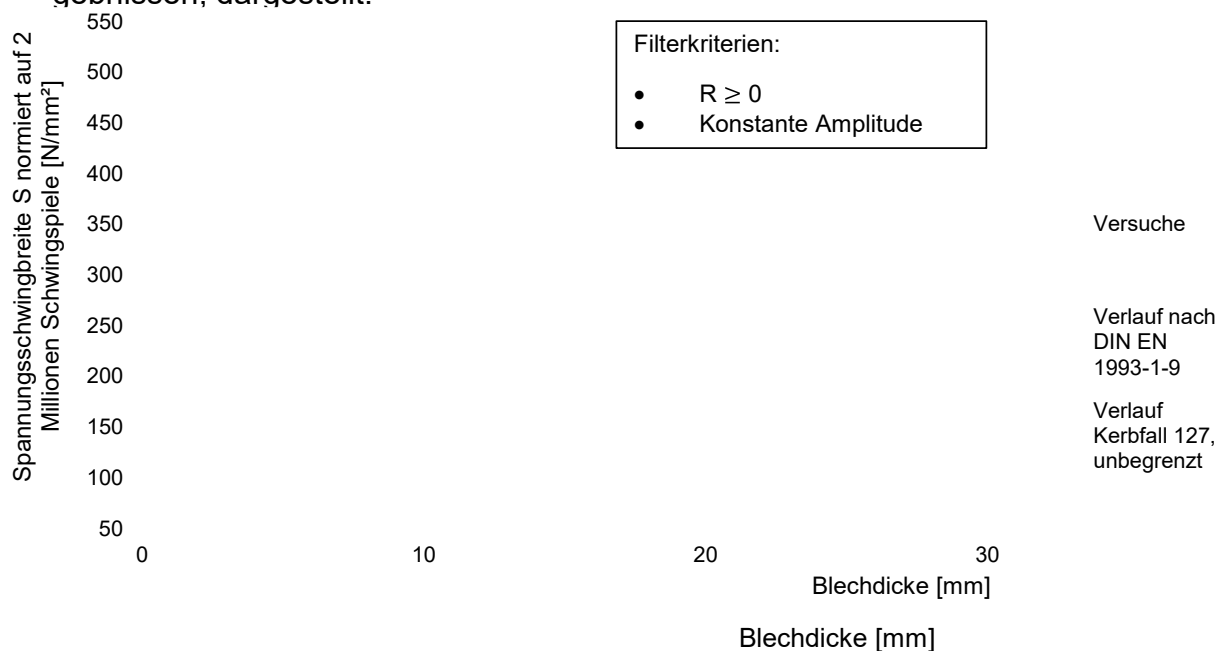


Bild 9-4: Blechdickeneinfluss Stumpfstoß im Schweißzustand belassen, Vergleich der experimentellen Untersuchungen mit Eurocode und FE Modell

Figure 9-4: Plate thickness influence of butt joint, as welded: Comparison of experimental data with Eurocode and FEM analysis

Weder das FE Modell, noch der Verlauf DIN EN 1993-1-9 [1] entsprechen dem Verlauf, der durch die experimentellen Ergebnisse abgebildet wird. Es lässt sich anhand der Datenmenge keine Korrelation zwischen der Blechdicke und der Ermüdungsfestigkeit erkennen.

Auf Grundlage der vorliegenden Daten kann ein Blechdickeneinfluss nach Gurney [33], wie in DIN EN 1993-1-9 [1] und den IIW-Empfehlungen [16] vorgeschlagen, nicht beobachtet werden. Für eine Neubewertung fehlen jedoch geeignete experimentelle Untersuchungen, insbesondere im Dickblechbereich. Für die Kerbfallempfehlungen in 10.4 wird daher empfohlen, die derzeitige Formel zur Berücksichtigung des Dickeneinflusses beizubehalten.

9.2.4.2 Einfluss der Schweißnahtüberhöhung bei Stumpfnähten

Influence of the weld toe height of butt joints

In älteren Datensammlungen wie [68] und [69] wird bei den im Schweißzustand belassenen Stumpfstößen keine weitere Unterscheidung im Hinblick auf die Schweißnahtüberhöhung oder den Schweißnahtanstiegswinkel gemacht.

Ein Ansatz für den Ursprung der normativen Berücksichtigung wird in [65] gegeben. Demnach wurde festgestellt, dass unterpulvergeschweißte Konstruktionen teilweise eine dicke und besonders hinsichtlich einer Ermüdungsbelastung, eine ungünstigere Nahtform aufweisen. Daher wurden Verbindungen, die auf diese Art geschweißt wurden, schlechter bewertet als andere Schweißarten. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass sorgfältig geschweißte UP-Schweißnähte eine günstigere Nahtform hervorbringen. Eine Beurteilung sollte sich demnach an der Schweißnahtgeometrie orientieren.

Als Referenz wurde eine realistische, von Hand geschweißte Naht gewählt, die in der Regel einen maximalen Nahtanstiegswinkel von 25° aufweist. Aufgrund der schwierigen Überprüfbarkeit dieses Wertes wurde stattdessen das Höhen/Breiten-Verhältnis der Naht reglementiert. Als ein Verhältnis, das dem Nahtanstiegswinkel 25° recht nahe kommt wurde ein Verhältnis $h/w = 0,1$ gewählt. Alle weiteren, schlechter geschweißten Nähte erhielten eine obere Grenze des Nahtüberhöhungs/Nahtbreiten-Verhältnis von $h/w = 0,2$ [65].

Ist der Schweißnahtanstiegswinkel gleich Null, handelt es sich um einen kerbfrei bearbeiteten Stumpfstoß.

Grundsätzlich sind in den meisten bekannten Untersuchungen keine Nahtanstiegswinkel dokumentiert. Für das Konstruktionsdetail der beidseitig geschweißten und im Schweißzustand belassenen Stumpfnah sind jedoch vier Quellen mit dokumentierten Nahtüberhöhungen und Nahtbreiten bekannt.

Um in den folgenden Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen Nahtanstiegswinkel, Nahtbreite und Nahtüberhöhung herstellen zu können, wird der in Bild 9-5 dargestellte Ansatz genutzt.

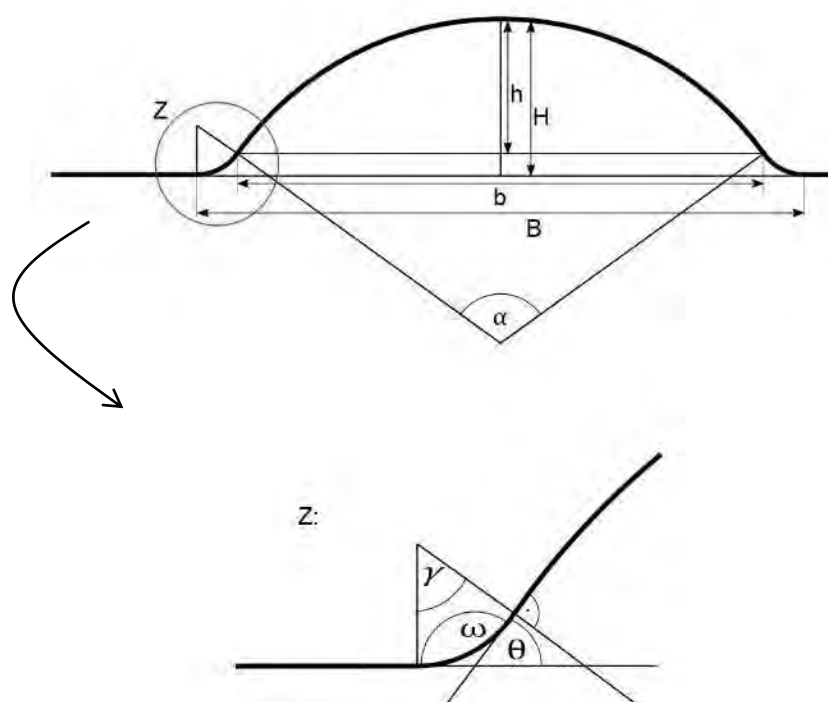


Bild 9-5: Model für geometrischen Zusammenhang von Schweißnahtanstiegswinkel, -breite und -höhe.

Figure 9-5: Model for geometrical connection between weld toe angle width and height

Formel (9.1) beschreibt den geometrischen Zusammenhang zwischen Schweißnahtanstiegswinkel θ , der Nahtbreite B sowie der Nahtüberhöhung H .

$$\theta = \arcsin\left(\frac{4HB}{4H^2+B^2}\right). \quad (9.1)$$

Die Datenlage im Hinblick auf das Nahtüberhöhungsverhältnis ermöglicht es, eine Auswertung der Daten durchzuführen.

Zur Auswertung des Einflusses wurden die Ergebnisse auf 2 Millionen Schwingspiele normiert. Die Auswertungen zeigen einen Zusammenhang zwischen der Nahtüberhöhung und der Ermüdungsfestigkeit. Dies wird auch durch experimentelle Untersuchungen in [39] bestätigt.

Mithilfe des Kerbspannungskonzepts kann eine deutliche Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit vom Schweißnahtanstiegswinkel festgestellt werden. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass auch die Nahtbreite (bei konstant bleibendem Schweißnahtanstiegswinkel) einen Einfluss hat. Eine ausführliche FE Studie ist im Anhang 27 F gegeben.

Eine Zusammenstellung der experimentellen Versuche mit den Ergebnissen des FE Modells ist in Bild 9-6 dargestellt.

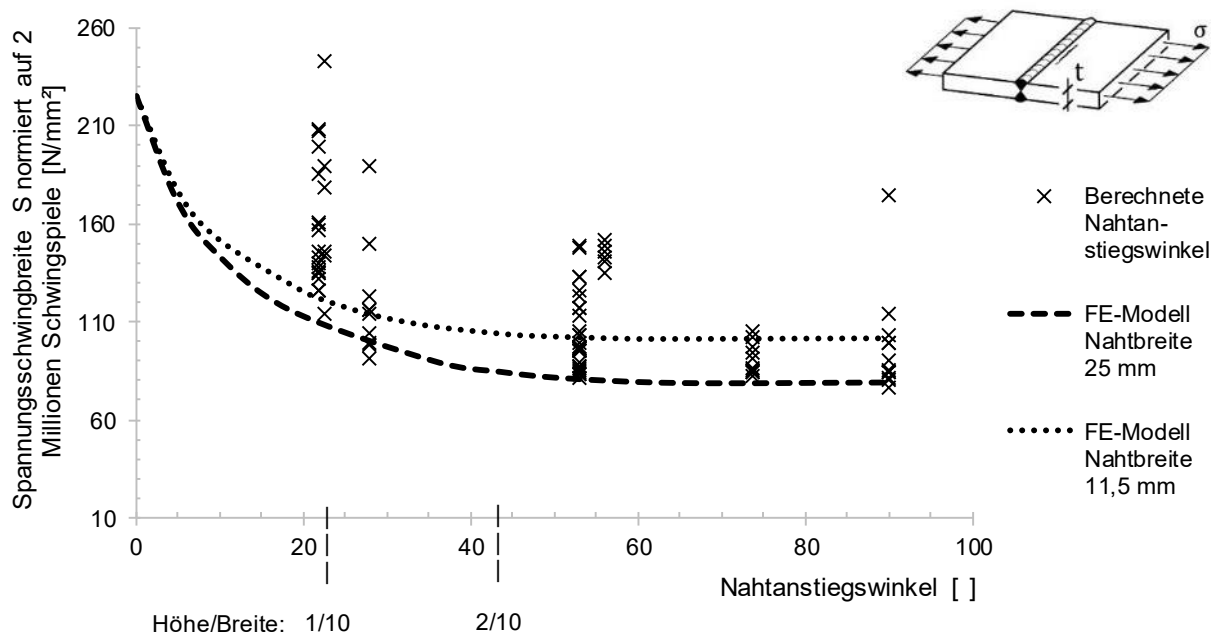


Bild 9-6: Einfluss des Nahtanstiegswinkels für Stumpfstöße im Schweißzustand belassen im Vergleich mit Ergebnissen aus dem FE Kerbspannungsmodell (Quellen IDs: #63, #272, #308)

Figure 9-6: Influence of the weld toe angle for as welded butt joints in comparison with outcome of effective notch stress analysis

Da der tatsächliche Nahtanstiegswinkel nur umständlich gemessen werden kann, wird die derzeitige Regelung in DIN EN 1993-1-9 [1] als geeignet angesehen. Dementsprechend wird eine Unterteilung hinsichtlich der Nahtüberhöhung auch für die Kerbfallempfehlung in Kapitel 10.4.2 berücksichtigt.

9.2.5 Details der Tabelle 8.4

Details of Table 8.4

9.2.5.1 Längeneinfluss der Längssteife

Length influence of longitudinal stiffeners

Für die statistische Bewertung des Längeneinflusses anhand der experimentellen Daten in der DAST/FOSTA Datenbank wird das in Kapitel 3.6 beschriebene Verfahren genutzt. Für die Auswertung werden nur Daten genutzt, zu welchen in den Originalquellen auch

entsprechende Steifenlängen angegeben wurden. Das Ergebnis ist in Bild 9-7 dargestellt. Auf Grundlage der experimentellen Daten wird ein Längeneinfluss nicht deutlich.

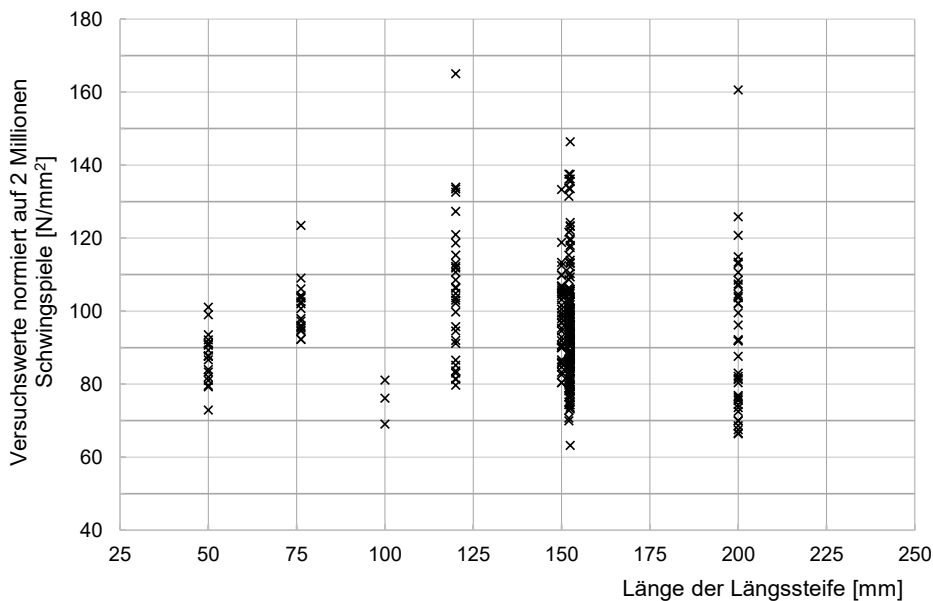


Bild 9-7: Normierte Versuchswerte in Abhängigkeit der Länge der Längssteife (Quellen IDs: 47, 139, 143, 145, 148, 149, 150, 151, 153, 158, 164, 260)

Figure 9-7: Standardised tests dependent on the attachment length

Ursprung des Längeneinflusses

Aus [147] geht hervor, dass der Längeneinfluss in DIN EN 1993-1-9 [1] ursprünglich auf Untersuchungen von Fisher in [148] zurückgeht. Experimentelle Untersuchungen wurden an mit Längsnähten befestigten Blechen durchgeführt, siehe Bild 9-8. Auch wenn das Konstruktionsdetail vergleichbar ist, handelt es sich nicht um eine Längssteife im Sinne von DIN EN 1993-1-9 [1]. Weiterführende Untersuchungen wurden von Hirt [82] durchgeführt. Dafür wurden ebenfalls die Daten von Fisher in Bild 9-8 herangezogen.

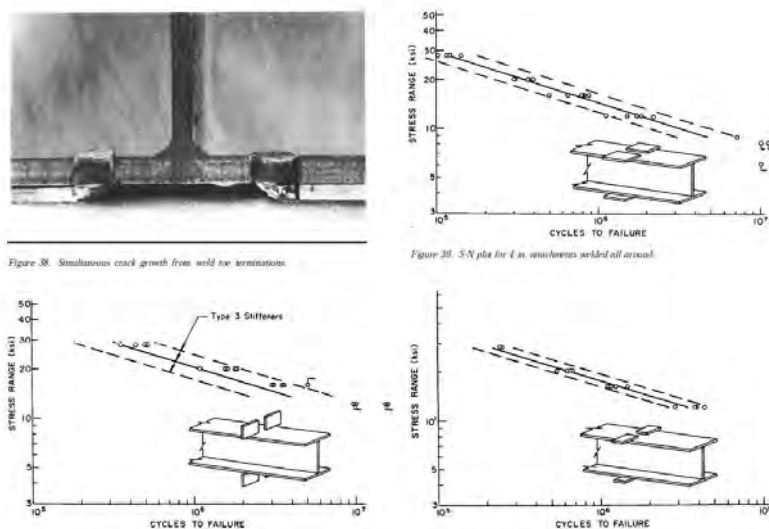


Bild 9-8: Experimentelle Untersuchungen an Längsnähten von Fisher [148]

Figure 9-8: Fatigue tests on flange tip attachments by Fisher [148]

Bild 9-9 zeigt einen Vergleich der Kerbfalleinstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1], den umgerechneten Nennspannungskerbfällen aus der FE Simulation sowie die Streuspannen aus den bekannten experimentellen Untersuchungen in der DAST/FOSTA Datenbank.

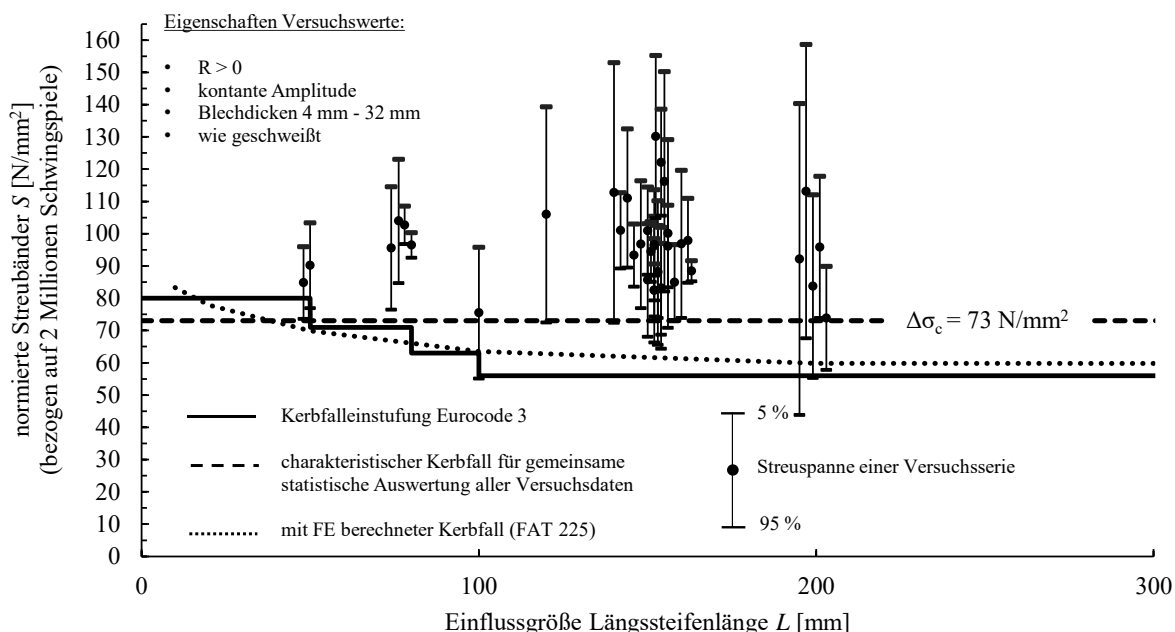


Bild 9-9: Vergleich der Eurocode 3 Einstufung mit den Ergebnisse der FE Simulation und Kerbspannungswöhlerlinie FAT 225

Figure 9-9: Comparison Eurocode 3 rules and results of finite element calculation with FAT 225

Die Kerbfallabstufung in Abhängigkeit der Steifenlänge korreliert gut mit den Ergebnissen der FE Betrachtung. Die experimentellen Daten dagegen zeigen keinen signifikanten Längeneinfluss.

Vorschlag für die Berücksichtigung bei der Bemessung

Die experimentellen Daten aus der DAST/FOSTA Datenbank zeigen keinen signifikanten Längeneinfluss in den experimentellen Daten. Zudem würde der theoretische Längeneinfluss nach den Ergebnissen des FE Modells nur im Bereich $L < 100$ mm einen nennenswerten Einfluss entfalten. Der für die Anwendung relevante Bereich liegt in der Regel bei Längssteifen mit $L > 100$ mm. Auch der Großteil der experimentellen Daten an denen ein gemeinsamer Kerbfall 73 abgeleitet wurde liegt im Bereich $L > 100$ mm. Aus den genannten Gründen wird für die finale Kerbfallempfehlung in Kapitel 10.5.2 eine Vernachlässigung des Längeneinflusses empfohlen.

9.2.6 Details der Tabelle 8.5

Details of Table 8.5

Nach DIN EN 1993-1-9 [1] sind in Tabelle 8.5 für die Kerbdetails 1, 4 und 6 Maßstabseffekte berücksichtigt.

Die Kerbfalleinstufung für Kerbdetail 1 (Kreuzstoß mit Versagen am Schweißnahtübergang) erfolgt in Abhängigkeit der Blechdicke t und des Abstands der Schweißnahtübergänge l (siehe Abschnitt 6.5). In Bild 9-10 sind die auf 2 Mio. Schwingspiele normierten,

mittleren Nennspannungsschwingbreiten der gefilterten Ermüdungsversuche (Abschnitt 6.5) über den jeweiligen Schweißnahtübergangsabständen l aufgetragen.

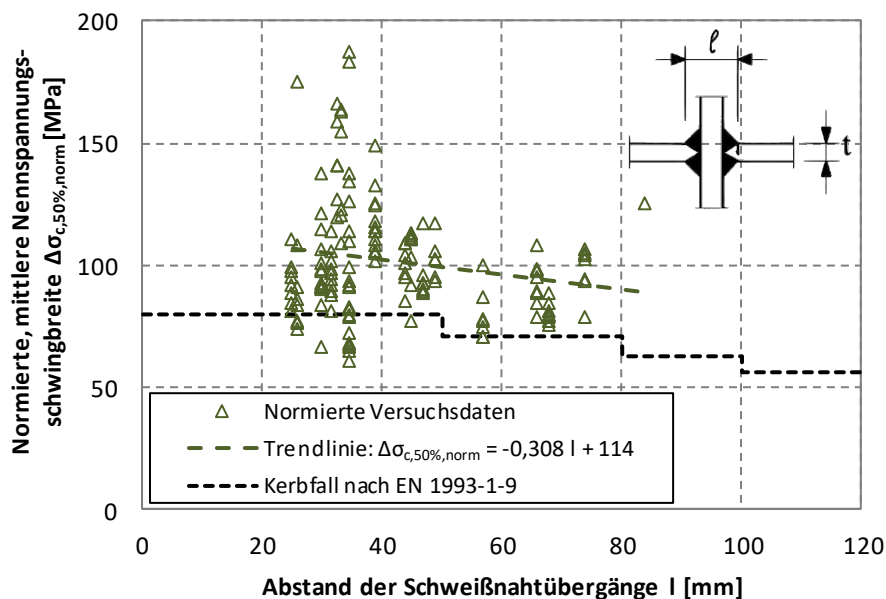


Bild 9-10: Untersuchung des Längeneinflusses (Abstand der Schweißnahtübergänge l) von Detail 1 (Tabelle 8.5)

Figure 9-10: Investigation of length influence (weld toe distance l) of detail 1 (table 8.5)

Der Parameterbereich der gefilterten Datenbasis umfasst für die Einflussgröße l Werte zwischen 25 mm und 84 mm. Anhand der linearen Trendlinie sind tendenziell geringere Ermüdungsfestigkeiten für größere Schweißnahtübergangsabstände feststellbar. Zum Einfluss der Blechdicke t auf die Ermüdungsfestigkeit kann aufgrund großer Streuung der vorliegenden Versuchsdaten im Parameterbereich $8 \text{ mm} \leq t \leq 38 \text{ mm}$ keine eindeutige Aussage abgeleitet werden.

Für die Ausführungsvariante der überlappenden Laschenverbindung nach DIN EN 1993-1-9 [1] (Kerbdetail 4) liegen, wie in Abschnitt 6.5 beschrieben, keinerlei Versuchsdaten vor. Daher kann ein möglicher Zusammenhang der Geometrieparameter l und t auf die Ermüdungsfestigkeit an dieser Stelle nicht untersucht werden.

Für Kerbdetail 6 (Gurtlamellenende – „Normalausführung“) können die nach DIN EN 1993-1-9 [1] definierten geometrischen Einflussgrößen (Grundblechdicke t und Lamellendicke t_c) anhand der gefilterten Datenbasis nicht untersucht werden, da lediglich für einen Parameterbereich $t_c \geq t$ und $t_c \leq 20 \text{ mm}$ Versuchsdaten vorliegen.

Anhand der Ermüdungsversuchsergebnisse der Kerbdetails aus Tabelle 8.5 kann kein Bauteileinfluss auf Grundlage von Klein- und Großbauteilserien abgeleitet werden. Die gefilterten Versuchsdaten der jeweiligen Details enthalten entweder ausschließlich Klein- oder Großbauteilversuche.

Für Kerbdetail 8 (schubbeanspruchte Kehlnähte) liegen Versuchsdaten für zwei unterschiedliche Probekörpertypen vor. Zum einen realitätsnahe 4-Punkt-Biegeversuche an geschweißten I-Trägern (Großbauteilversuche) und zum anderen Torsionsversuche an Kreishohlprofilen mit beidseitig angeschweißter Stirnplatte (Ersatzprobekörper). Der Einfluss der unterschiedlichen Probekörpertypen auf die Ermüdungsfestigkeit ist auf Grundlage der gefilterten Datenbasis aus Abschnitt 6.5 in Bild 9-11 dargestellt.

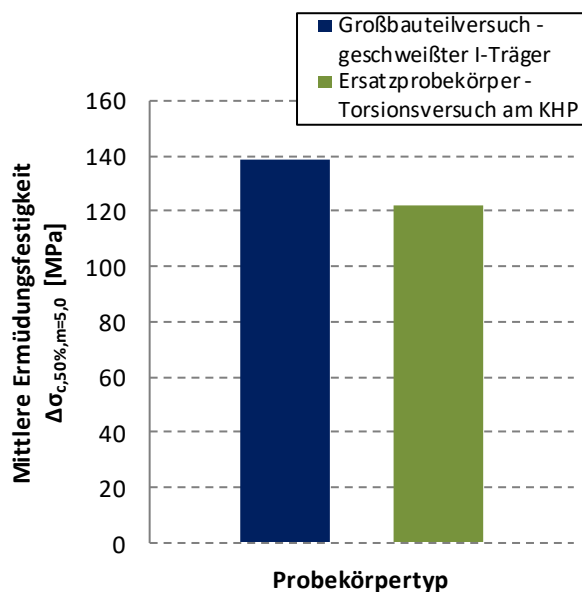


Bild 9-11: Untersuchung des Einflusses verschiedener Probekörpertypen von Detail 8 (Tabelle 8.5)

Figure 9-11: Investigation of different specimen types of detail 8 (Table 8.5)

Für die Gegenüberstellung werden die Testdaten entsprechend des Probekörpertyps gruppiert und separat ausgewertet. Die Gegenüberstellung beruht auf der Annahme einer festen Neigung der Regressionsgeraden von $m = 5$ (Schubversagen) und stellt den charakteristischen Wert für 2 Mio. Schwingspiele bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % dar.

9.2.7 Details der Tabelle 8.6

Details of Table 8.6

Nach Tabelle 8.6 – „Hohlprofile“ (DIN EN 1993-1-9 [1]) sind sowohl für die geschweißten Stumpfstoße (Kerbdetail 3 und 4) als auch für die geschweißten Stirnplattenstoße (Kerbdetail 6 bis 9) Maßstabeffekte in Abhängigkeit der Hohlprofilwanddicke t berücksichtigt.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Kreishohlprofilwanddicke t von Kerbdetail 3 (stumpfgestoßenes Kreishohlprofil) auf die Ermüdungsfestigkeit der gefilterten Versuche (Abschnitt 6.6) ist in Bild 9-12 dargestellt.

Die Trendlinie zeigt tendenziell einen moderaten Anstieg der Ermüdungsfestigkeit für größere Wanddicken. Bei der Auswertung und Interpretation der Einflussgröße muss jedoch berücksichtigt werden, dass für sehr große Wanddicken bisher nur wenige Einzelversuchsdaten vorliegen. Auch beinhaltet die gefilterte Datenbasis keine Versuchsdaten für Wanddicken $t \leq 8 \text{ mm}$. Die nach DIN EN 1993-1-9 [1] um zwei Kerbfallklassen niedrigere Einstufung des Wanddickenbereichs $t \leq 8 \text{ mm}$ kann daher nicht bestätigt werden.

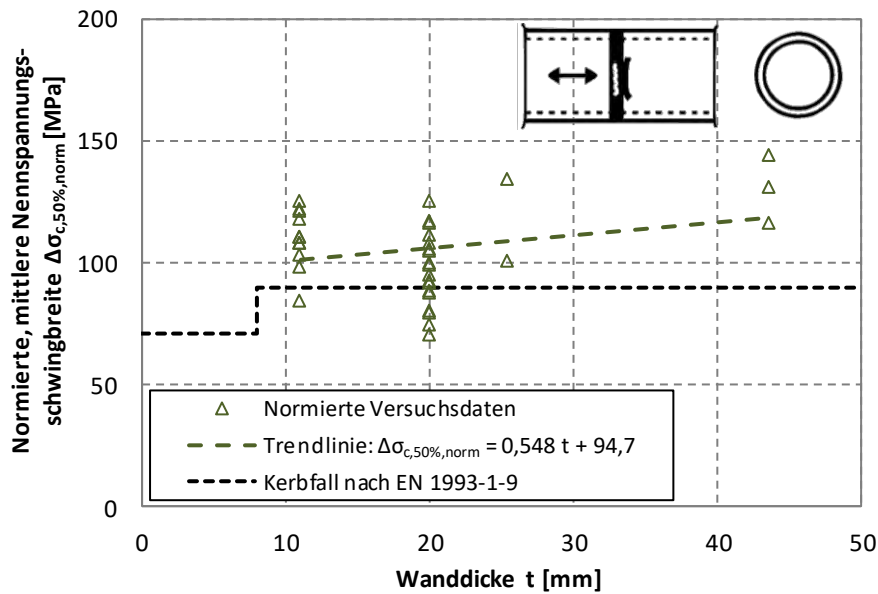


Bild 9-12: Untersuchung des Wanddickeneinflusses t von Detail 3 (Tabelle 8.6)

Figure 9-12: Investigation of wall thickness influence t of detail 3 (Table 8.6)

Auch die stumpfgestoßenen Rechteckhohlprofile (Kerbdetail 4) dürfen nach DIN EN 1993-1-9 [1] für Blechdicken $t > 8 \text{ mm}$ zwei Kerbfallklassen (von Kerbfall 56 auf Kerbfall 71) höher eingestuft werden. Eine Untersuchung des Wanddickeneinflusses liefert dagegen nur einen geringen bis gar keinen Einfluss der Wanddicke auf die Ermüdungsfestigkeit des Kerbdetails 4. Die gefilterte Datenbasis beinhaltet zudem nur Versuche an Hohlprofilen mit Wanddicken im Bereich von 4 mm bis 8 mm. Aussagen über den Wanddickenbereich $t > 8 \text{ mm}$ lassen sich aus dieser Versuchsdatenbasis nicht ableiten, siehe Bild 9-13.

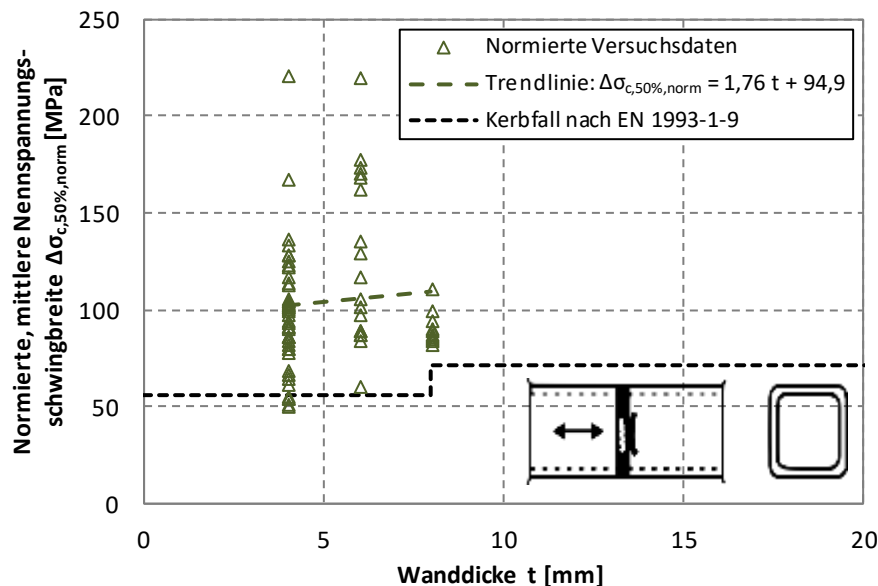


Bild 9-13: Untersuchung des Wanddickeneinflusses t von Detail 4 (Tabelle 8.6)

Figure 9-13: Investigation of wall thickness influence t of detail 4 (table 8.6)

Für die geschweißten Stirnplattenstößen (Kerbdetail 6 bis 9) wird nach DIN EN 1993-1-9 [1] auch eine Abhängigkeit von der Wanddicke angenommen. Die Ausführungsvarianten mit Kehlnähten (Kerbdetail 8 und 9) sind auf Wanddicken $t \leq 8 \text{ mm}$ beschränkt. Die HV-

Stumpfnahschweißungen (Kerbdetail 6 und 7) dürfen für Wanddicken $t > 8 \text{ mm}$ je einen Kerbfall höher eingestuft werden.

Die gegenwärtige Datenbasis beinhaltet nur Versuchsdaten des kehlnahtgeschweißten Stirnplattenstoßes am Rechteckhohlprofil (Kerbdetail 9). Der Einfluss der Wanddicke auf die Ermüdungsfestigkeit ist in Bild 9-14 dargestellt. Die Trendlinie zeigt für den Parameterbereich $4 \text{ mm} \leq t \leq 8 \text{ mm}$ einen Anstieg der Ermüdungsfestigkeit mit zunehmender Wanddicke.

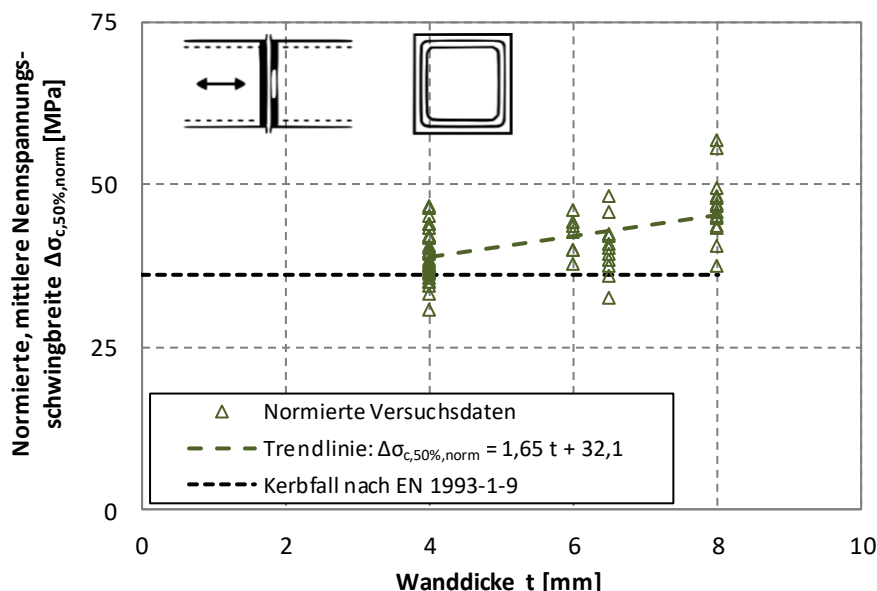


Bild 9-14: Untersuchung des Wanddickeneinflusses t von Detail 4 (Tabelle 8.6)

Figure 9-14: Investigation of wall thickness influence t of detail 4 (table 8.6)

9.2.8 Details der Tabelle 8.7

Details of Table 8.7

Die Details der Tabelle 8.7, geschweißte Knoten von Fachwerkträgern, besitzen zahlreiche Maßstabeffekte, die in den Kerbfalltabellen größtenteils durch Anforderungen enthalten sind, vergleiche Tabelle 6-65. Bei den meisten geometrischen Anforderungen lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen. Dies trifft auf die Dickenbeschränkung der Diagonalen $t_i \leq 8 \text{ mm}$, Breite- und Durchmesserbeschränkung $b_0 \leq 200 \text{ mm}$ bzw. $d_0 \leq 300 \text{ mm}$, Beschränkung des Breiten- bzw. Durchmesserverhältnisses $0,4 \leq \frac{b_i}{b_0} \leq 1$ bzw. $0,25 \leq \frac{d_i}{d_0} \leq 1$ und die Beschränkung des Verhältnisses zwischen Ausmitte und Höhe bzw. Durchmesser $-0,5 h_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 h_0$ bzw. $-0,5 d_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 d_0$ zu. Ferner scheint der Winkel der Diagonalen, der durch $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ beschränkt ist, keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit zu haben.

Die maßgebende geometrische Einflussgröße ist laut Kerbfalltabelle das Wandstärkenverhältnis, denn von diesem hängen die Kerbfälle aller Details ab. Diese Abhängigkeit lässt sich durchgehend anhand der Versuchsergebnisse zeigen, sodass sie als signifikant bezeichnet werden kann. Bild 9-15 zeigt zwei Beispiele.

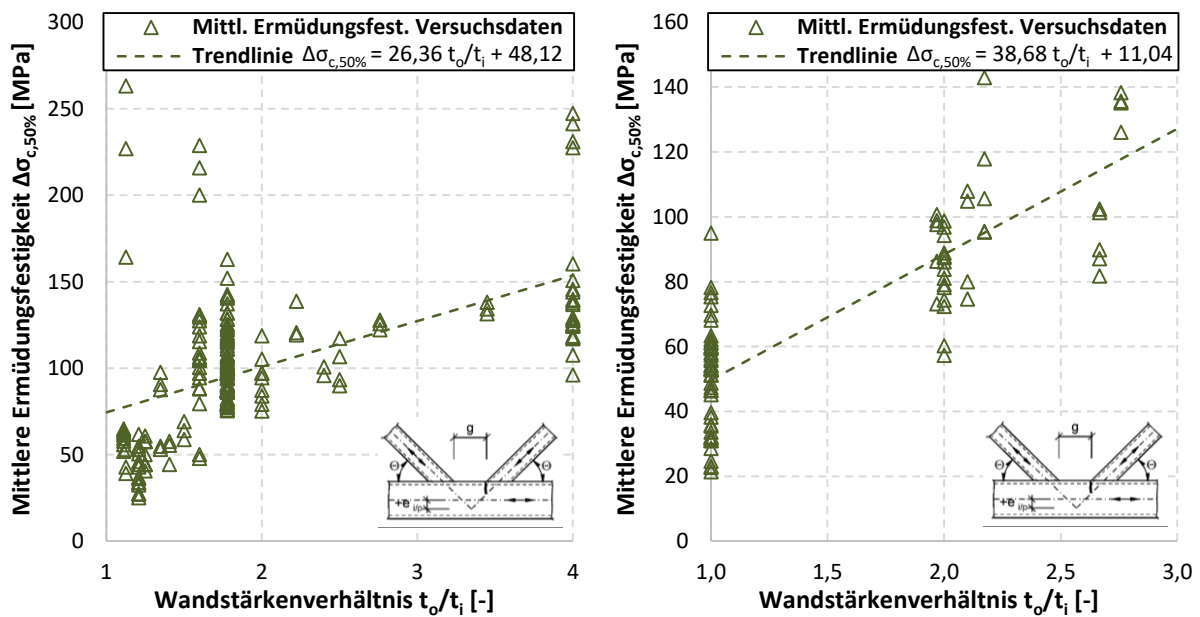


Bild 9-15: Untersuchung des Einflusses des Wandstärkenverhältnisses des Details 1 (links) und Details 2 (rechts) der Tabelle 8.7

Figure 9-15: Investigation of the influence of thickness ratio of detail 1 (left) and detail 2 (right) of Table 8.7

Ferner wird die Wandstärke des Gurtes im Kerbfallkatalog durch $t_0 \leq 8 \text{ mm}$ beschränkt. Bei allen Details zeigt sich jedoch, dass sich eine größere Wandstärke des Gurtes positiv auf die Ermüdungsfestigkeit auswirkt. Zwei Beispiele hierfür sind in Bild 9-16 gezeigt.

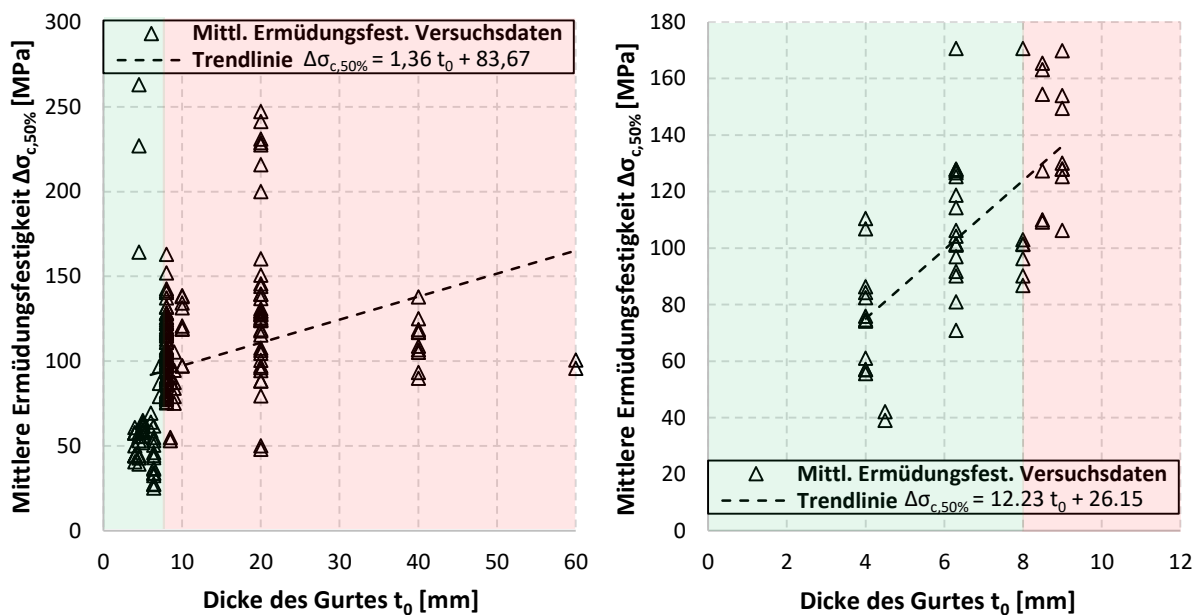


Bild 9-16: Untersuchung des Einflusses der Gurtwandstärke des Details 1 (links) und Details 4 (rechts) der Tabelle 8.7

Figure 9-16: Investigation of the influence of chord thickness of detail 1 (left) and detail 4 (right) of Table 8.7

Des Weiteren wurde in Abschnitt 6.7 bereits erwähnt, dass die Anforderung $\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_1} \leq 25$ bzw. $\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_1} \leq 25$ vom Großteil der untersuchten Probekörper nicht erfüllt wird. Bei der Untersuchung des Einflusses dieses Verhältnisses konnten unter den Details gegensätzliche Trends festgestellt werden, wie Bild 9-17 zeigt.

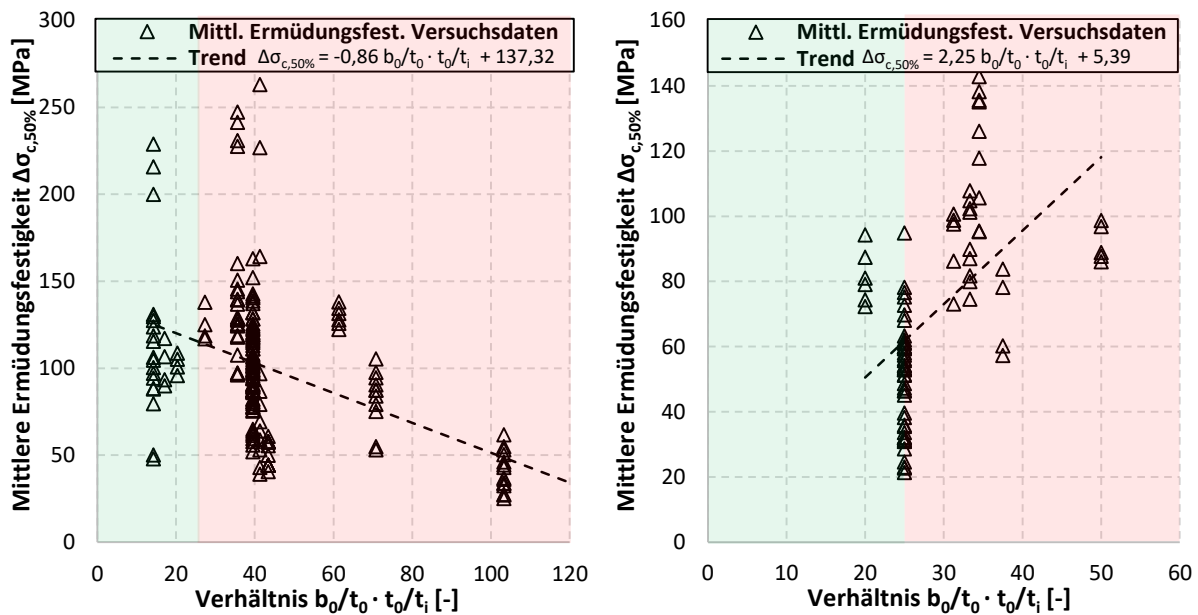


Bild 9-17: Untersuchung des Einflusses des Verhältnis $\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i}$ bzw. $\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i}$ des Details 1 (links) und Details 2 (rechts) der Tabelle 8.7

Figure 9-17: Investigation of the influence of the ratio $\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i}$ or $\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i}$ of detail 1 (left) and detail 2 (right) of Table 8.7

Bei allen Untersuchungen zu den Maßstabeffekten der Rohrknotten ist jedoch zu beachten, dass die meisten Trends nicht unabhängig untersucht werden können, da sich die Geometrien meistens in mehr als einer Größe unterscheiden und die Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit zahlreich sind.

9.3 Mittelspannungseinfluss

Mean stress influence

9.3.1 Übersicht

Overview

In diesem Abschnitt werden Untersuchungen zum Einfluss der Mittelspannung, bzw. des Spannungsverhältnisses (siehe Abschnitt 2.2), auf die Ermüdungsfestigkeit von Details der Tabellen 8.1, 8.2, 8.5 und 8.7 vorgestellt.

9.3.2 Details der Tabelle 8.1

Details of Table 8.1

Der Mittelspannungseinfluss kann in DIN EN 1993-1-9 [1] bei nicht geschweißten und geschweißten, spannungsarm geglühten Konstruktionen positiv berücksichtigt werden, siehe Abschnitt 2.3.2.4. Die reduzierte Spannungsschwingbreite berechnet sich dabei als Summe des Zuganteils der Spannungsschwingbreite und 60 % des Druckanteils. Für die Details der Tabelle 8.1, die nicht geschweißte Konstruktionen umfasst, spielt die Regelung zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinfluss eine große Rolle.

Bild 9-19 zeigt die mittlere Ermüdungsfestigkeit der Versuchsdaten in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses für Detail 2 (Walzprofil) und Detail 5 (brenngeschnittene Kante ohne Nachbearbeitung) der Tabelle 8.1.

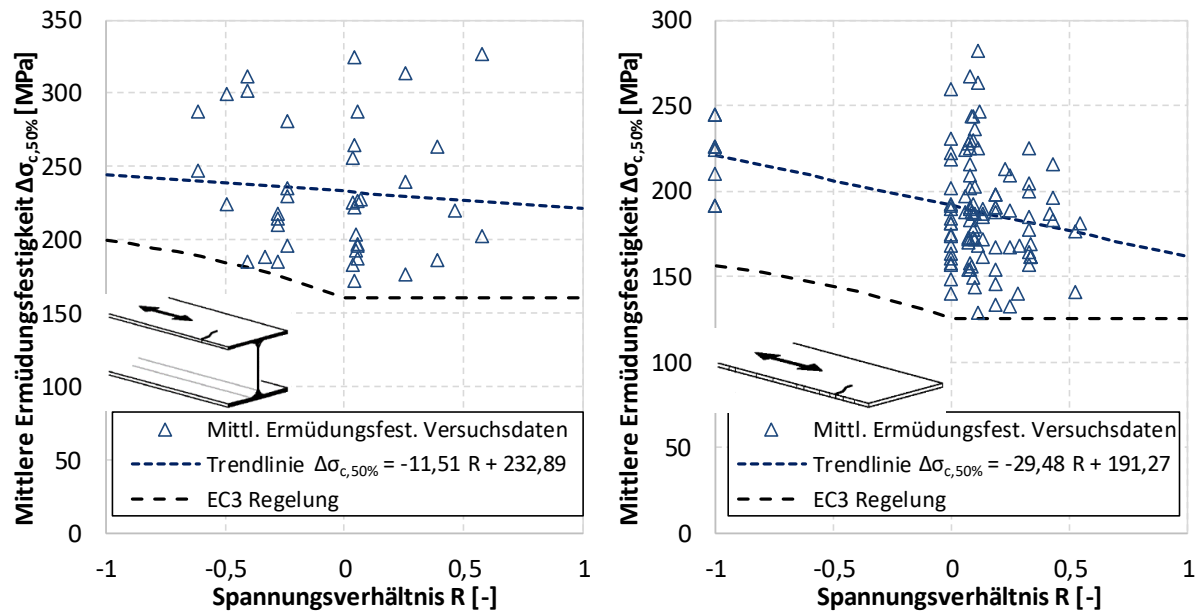


Bild 9-18: Untersuchung des Mittelspannungseinflusses des Details 2 (links) und Details 5 (rechts) der Tabelle 8.1

Figure 9-18: Investigation of the medium stress influence of detail 2 (left) and detail 5 (right) of Table 8.1

Es lässt sich anhand der Daten im Mittel bei beiden Details ein abnehmender Trend der Ermüdungsfestigkeit mit zunehmendem Spannungsverhältnis erkennen. Beim Walzprofil ist dieser jedoch anhand der mittleren Trendlinie kaum ausgeprägt. Im Vergleich zur Regelung der DIN EN 1993-1-9 [1] lässt sich erkennen, dass im Bereich negativer Spannungsverhältnisse keine Versuchsdaten unterhalb der Kerbfallbegrenzung liegen. Beim Detail 5, der brenngeschnittenen Kante ohne Nachbearbeitung, ist der Trend anhand von Mittelwerten und unterer Grenze eindeutiger. Auch die DIN EN 1993-1-9 [1] Regelung ist konservativ.

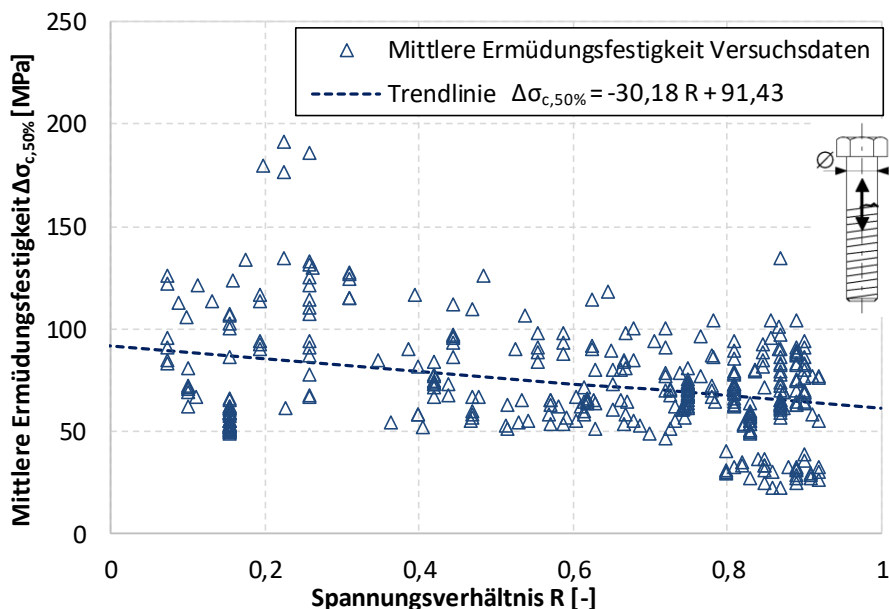


Bild 9-19: Untersuchung des Mittelspannungseinflusses des Details 14 der Tabelle 8.1

Figure 9-19: Investigation of the medium stress influence of detail 14 of Table 8.1

Ferner lässt sich eine leichte Mittelspannungsabhängigkeit für die Schraube, Detail 14, erkennen, siehe Bild 9-19. Mit zunehmender Mittelspannung nimmt die Ermüdungsfestigkeit leicht ab.

Bei Schrauben kommen aufgrund des positiven Effekts der Vorspannung häufig sehr große Spannungsverhältnisse vor. Da durch eine hohe Vorspannung die Spannungsschwingbreite auf die Schraube deutlich verringert werden kann, ist der möglicherweise negative Einfluss des hohen Spannungsverhältnisses auf die Ermüdungsfestigkeit hinzunehmen. Ferner scheint der Mittelspannungseinfluss bei der Schraube nicht signifikant zu sein.

9.3.3 Details der Tabelle 8.2

Details of Table 8.2

In geschweißten Komponenten kommt ein Mittelspannungseinfluss aufgrund der größeren Kerbwirkung dieser Details häufig nicht zum Tragen. Bild 9-20 zeigt beispielhaft die Untersuchung des Mittelspannungseinfluss bei automatisch hergestellten Längsnähten mit Ansatzstellen (Detail 3) und handgeschweißten Längsnähten (Detail 5). Die DIN EN 1993-1-9 [1] Regelung zur Berücksichtigung von reduzierten Spannungsschwingbreiten im Druckbereich bei ungeschweißten Details wird zum Vergleich ebenfalls dargestellt.

Bei Detail 3 lässt sich anhand der umfangreichen Datenbasis kein Mittelspannungseinfluss erkennen. Dies trifft auch auf Detail 2, automatisch hergestellte Längsnähte ohne Ansatzstellen, zu. Detail 5 umfasst insgesamt deutlich weniger Datenpunkte, wobei sich ein leichter Mittelspannungseinfluss zeigt, welcher sich mit der DIN EN 1993-1-9 [1] Regelung deckt: Mit zunehmendem Spannungsverhältnis sinkt die Ermüdungsfestigkeit.

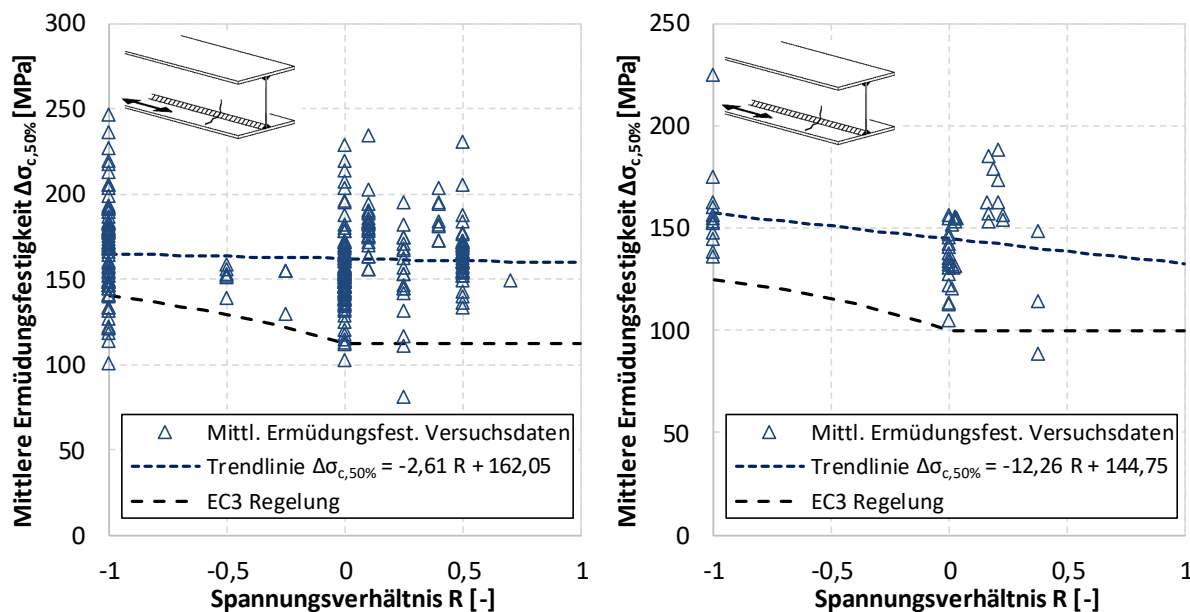


Bild 9-20: Untersuchung des Mittelspannungseinflusses des Details 3 (links) und Details 5 (rechts) der Tabelle 8.2

Figure 9-20: Investigation of the medium stress influence of detail 3 (left) and detail 5 (right) of Table 8.2

9.3.4 Details der Tabelle 8.5

Details of Table 8.5

Zur Mittelspannungsabhängigkeit der Kerbdetails aus Tabelle 8.5 sind nachfolgend die Untersuchungen an ausgewählten Details dargestellt.

Anhand der gefilterten Datenbasis des Kerbdetails 3 (Kreuzstoß mit Schweißnahtwurzelversagen) ist ein signifikanter Einfluss der Mittelspannung auf die Ermüdungsfestigkeit dieser Kleinteilversuche feststellbar (Bild 9-21). Die lineare Trendlinie der mittleren Ermüdungsfestigkeiten zeigt eine deutliche Tendenz zu geringeren Lebensdauern im Zugschwellbereich ($0,0 \leq R < 1,0$). Ein Erklärungsansatz liefert die nach dem Schweißen erfolgte Ausarbeitung der Kleinteilproben, die zu einem teilweisen Abbau der Schweißspannungen führen kann. Zudem werden, wie bereits in Abschnitt 6.5 beschrieben, insbesondere beim nicht durchgeschweißten Kreuzstoß in der Schweißnahtwurzel günstig wirkende Druckeigenstressungen angenommen. Diese sich günstig auf die Ermüdungsfestigkeit auswirkenden Druckeigenstressungen können jedoch infolge großer Zugspannungen, bspw. bei großen Spannungsverhältnissen $R \geq 0,5$, plastisch abgebaut werden. Ein positiver Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit ist dann nicht mehr feststellbar.

Mangels experimenteller Untersuchungen an Großbauteilen, die repräsentative und realitätsnahe Eigenstresszustände abbilden, lassen sich für Kerbdetail 3 keine eindeutigen Aussagen zur Mittelspannungsabhängigkeit ableiten.

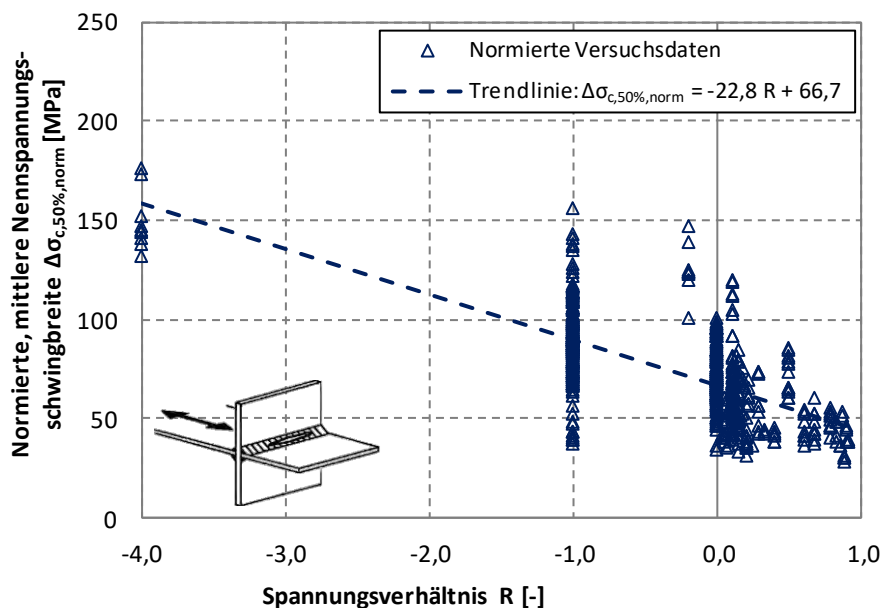


Bild 9-21: Untersuchung des Mittelspannungseinflusses bei Detail 3 (Tabelle 8.5)

Figure 9-21: Investigation of mean stress influence of detail 3 (table 8.5)

Der Einfluss der Mittelspannungsabhängigkeit der Kleinbauteilversuche des Kerbdetails 3 kann auch im Dauerfestigkeitsschaubild nach Haigh (Bild 9-22) dargestellt werden. Für die Darstellung wird die gefilterte Datenbasis (Abschnitt 6.5) in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses in Intervalle unterteilt, gruppiert und separat ausgewertet. Da das Haigh-Diagramm in erster Linie als Dauerfestigkeitsdiagramm Anwendung findet, wird die dargestellte mittlere Ermüdungsfestigkeit auf 5 Mio. Lastspiele (vgl. Dauerfestigkeitsbereich DIN EN 1993-1-9 [1]) bezogen. Zur Bestimmung der mittleren Ermüdungsfestigkeit

der zu den jeweiligen Spannungsverhältnisintervallen gehörenden Versuchsdaten wird eine feste Neigung der Regressionsgeraden von $m = 3,0$ angenommen. Für die vorliegende gefilterte Datenbasis liefert eine Unterteilung in Intervalle von $R = 0,5$ repräsentative Ergebnisse. Bei dieser Auswertemethode kann die Mittelspannungsempfindlichkeit mit $M = 0,35$ quantifiziert werden. Die gewählte Datenbasis weist eine hohe Mittelspannungsabhängigkeit auf.

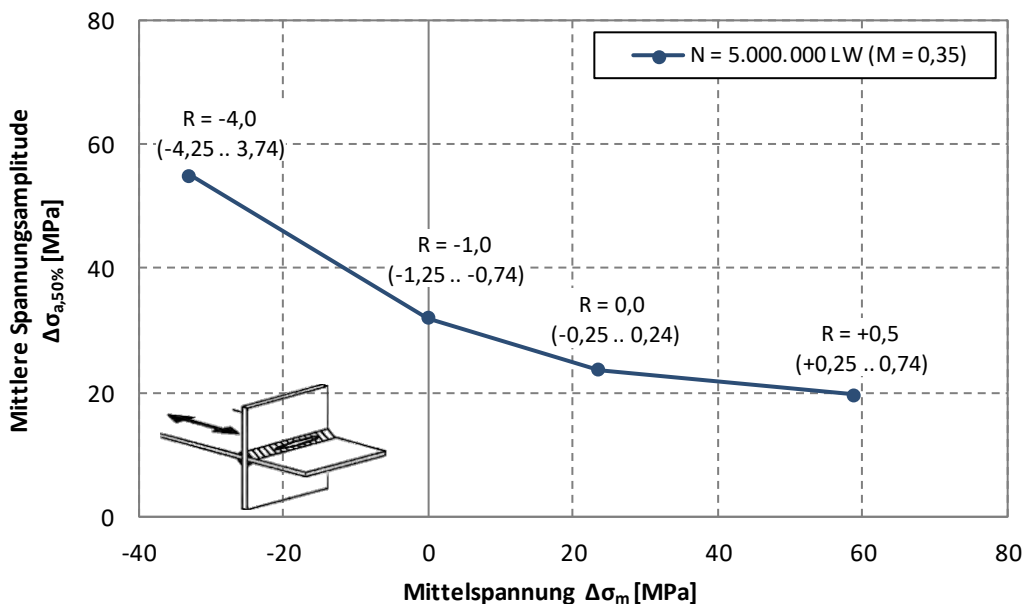


Bild 9-22: Haigh-Diagramm – Darstellung der Mittelspannungsabhängigkeit von Detail 3 (Tabelle 8.5)

Figure 9-22: Haigh diagram – figure of mean stress influence of detail 3 (table 8.5)

Für das Kerbdetail 6 liegen Großbauteilversuche, die repräsentative und realitätsnahe Eigenspannungszustände abbilden, vor. Zwar decken die Versuchsdaten nur einen Teilbereich der Geometrieparameter (Gurtlamellendicke t_c größer als Gurtblechdicke t und $t_c \leq 20\text{ mm}$) ab, dennoch müsste sich der Mittelspannungseinfluss auf die Ermüdungsfestigkeit anhand dieser Probekörper nachweisen lassen. Bild 9-23 zeigt aber, dass für diese Versuchsdaten kein signifikanter Mittelspannungseinfluss vorliegt. Die Annahme von hohen Eigenspannungszuständen erscheint für diese Großbauteile berechtigt.

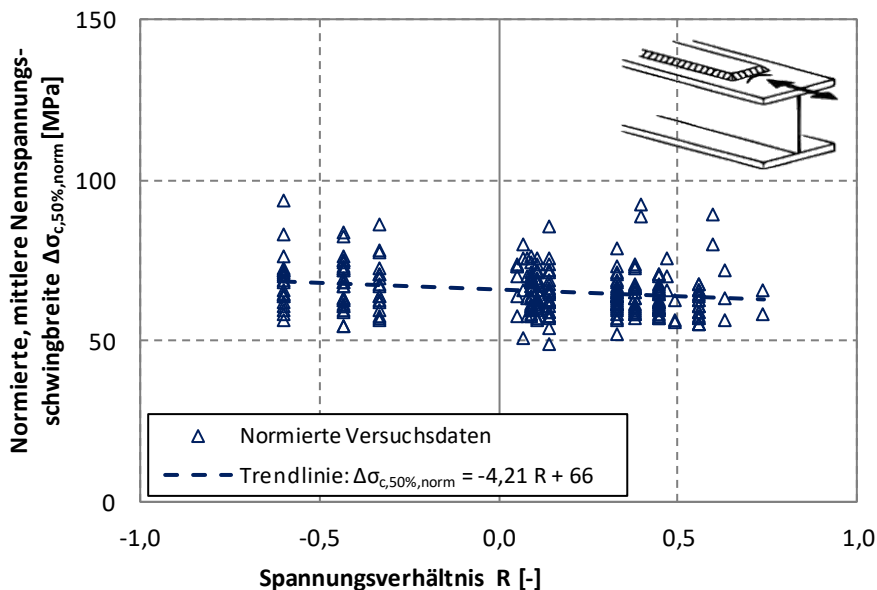


Bild 9-23: Untersuchung des Längeneinflusses (Abstand der Schweißnahtübergänge l) von Detail 1 (Tabelle 8.5)

Figure 9-23: Investigation of length influence (weld toe distance l) of detail 1 (table 8.5)

9.3.5 Details der Tabelle 8.7

Details of Table 8.7

Die Details der Tabelle 8.7, geschweißte Knoten von Fachwerkträgern, besitzen zahlreiche Maßstabeffekte, weswegen andere Einflüsse in den Hintergrund treten. Jedoch lässt sich bei zwei Details ein Mittelspannungseinfluss erkennen, wie Bild 9-24 zeigt. Versuche an Rohrknoten werden häufig bei einem Spannungsverhältnis von -1 durchgeführt.

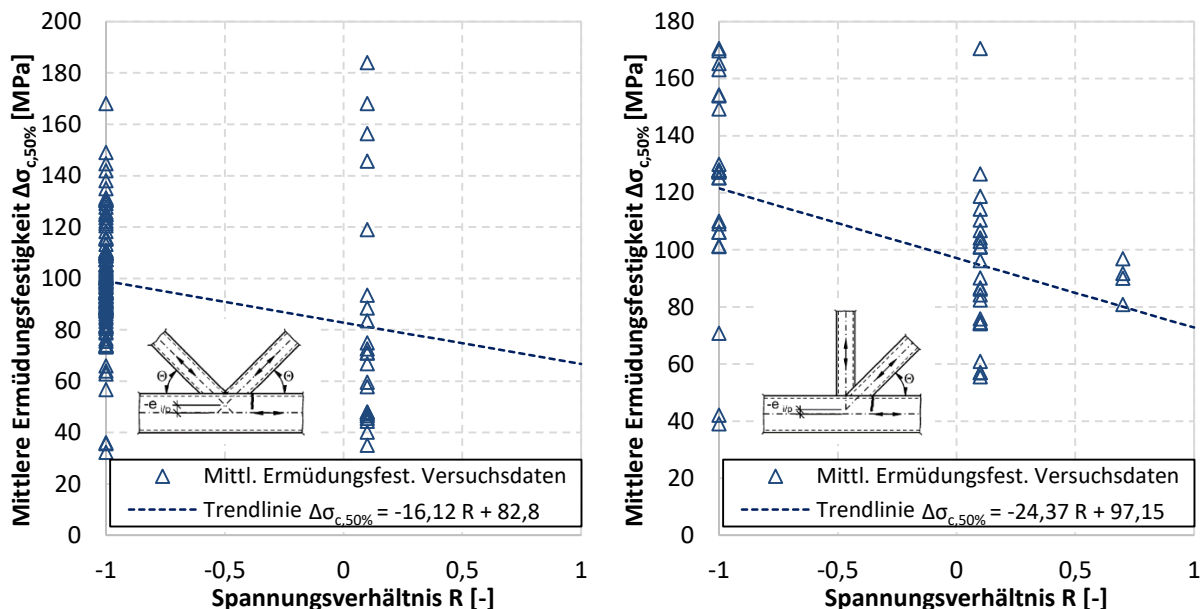


Bild 9-24: Untersuchung des Mittelspannungseinflusses des Details 3 (links) und Details 4 (rechts) der Tabelle 8.7

Figure 9-24: Investigation of the medium stress influence of detail 3 (left) and detail 4 (right) of Table 8.7

9.4 Streckgrenzeinfluss

Yield stress influence

9.4.1 Übersicht

Overview

In diesem Abschnitt werden Untersuchungen zum Einfluss der Streckgrenze auf die Ermüdungsfestigkeit vorgestellt. Insbesondere die Details der Tabelle 8.1 und 8.3 werden hierbei intensiv betrachtet. Bei den Details der übrigen Tabellen konnte kein deutlicher Streckgrenzeinfluss festgestellt werden.

9.4.2 Detail der Tabelle 8.1

Details of Table 8.1

Vor allem für ungeschweißte Details wird häufig ein Streckgrenzeinfluss angenommen (siehe Abschnitt 2.4.3).

Bild 9-25 zeigt die mittlere Ermüdungsfestigkeit der Versuchsdaten in Abhängigkeit der Streckgrenze für Detail 2 (Walzprofil) und Detail 4 (brenngeschnittene Kante mit Nachbearbeitung) der Tabelle 8.1.

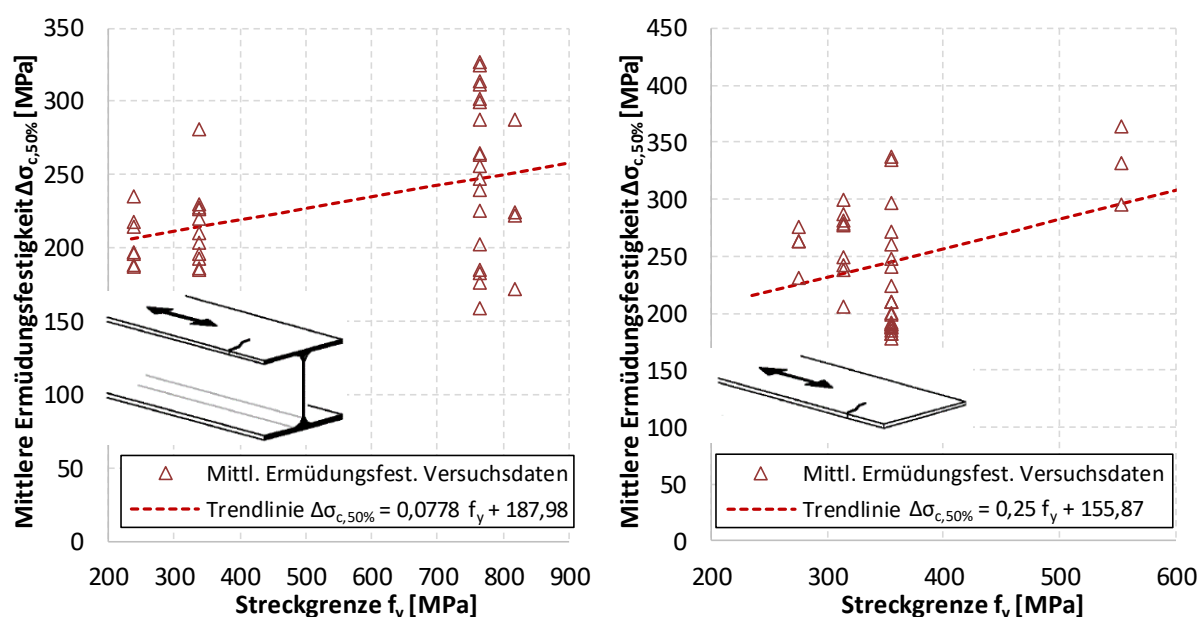


Bild 9-25: Untersuchung des Streckgrenzeinflusses des Details 2 (links) und Details 4 (rechts) der Tabelle 8.1

Figure 9-25: Investigation of the yield strength influence of detail 2 (left) and detail 4 (right) of Table 8.1

Bei beiden Details lässt sich eine zunehmende mittlere Ermüdungsfestigkeit mit steigender Streckgrenze feststellen. In Hinblick auf die unteren Versuchswerte und die Streuung der Daten scheint dieser Einfluss beim Walzprofil (Detail 2) nicht signifikant zu sein. Bei der gewalzten Kante mit Nachbearbeitung zeigt sich anhand der unteren Grenzwerte ein Trend, der im höherfesten Bereich bei einer Streckgrenze von 550 MPa jedoch nur durch 3 Versuchswerte gestützt wird.

Ein eindeutiger Trend konnte bei Detail 8, der symmetrischen zweischnittigen Verbindung mit vorgespannten Schrauben, festgestellt werden, siehe Bild 9-26 (links).

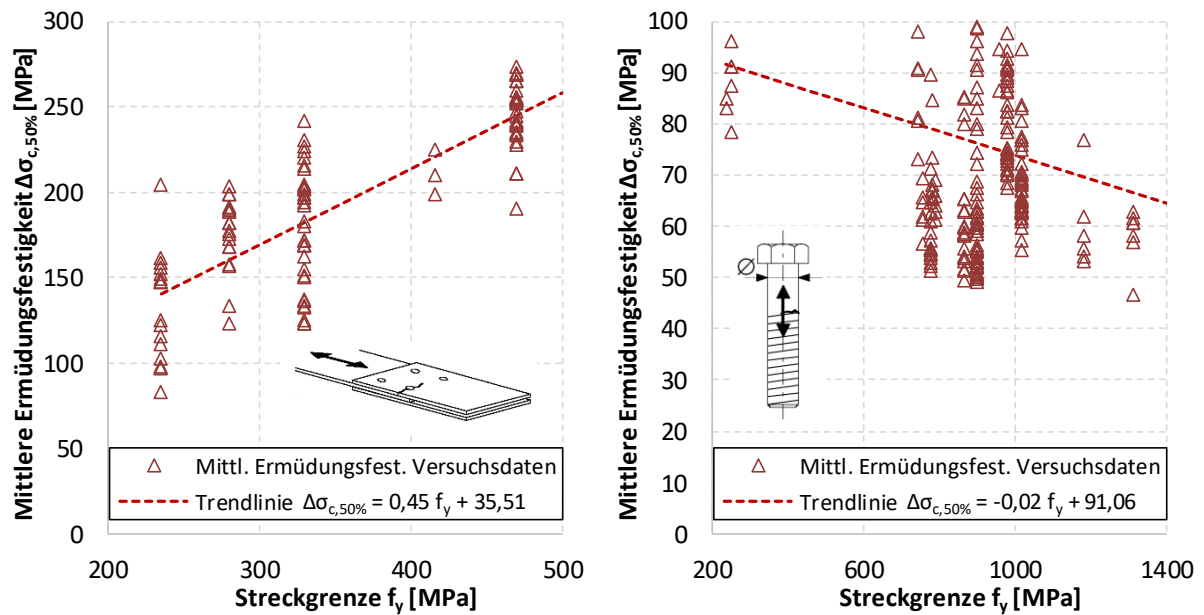


Bild 9-26: Untersuchung des Streckgrenzeinflusses des Details 8 (links) und Details 14 (rechts) der Tabelle 8.1

Figure 9-26: Investigation of the yield strength influence of detail 8 (left) and detail 14 (right) of Table 8.1

Mit zunehmender Streckgrenze steigt die Ermüdungsfestigkeit des Details deutlich an. Dies wurde auch innerhalb in Abschnitt 6.1.5.4 vorgestellten Untersuchungen festgestellt. Bei Detail 8 handelt es sich durch die Vorspannung der Verbindung um ein sehr kerbares Detail. Dies zeigen auch die Versuchsergebnisse: Sie weisen im Wöhlerdiagramm eine äußerst flache Neigung auf. Aus diesem Grund zeigt sich der Streckgrenzeinfluss hier sehr deutlich. Bei einer Einzelauswertung aller 56 Versuchsergebnisse aus Quelle #008 zur Stahlgüte S460 ergibt mit $m = 5$ einen Kerbfall von 211. Für $m = 3$ ergibt sich Kerbfall 165.

Anders zeigt sich die Tendenz des Streckgrenzeinflusses bei Detail 14, der Schraube, siehe Bild 9-26 (rechts). Die Schraube stellt aufgrund der äußeren und geometrischen Kerben am Gewinde ein sehr kerbscharfes Detail dar. Bei der Untersuchung des Streckgrenzeinflusses zeigt sich eine Erhöhung der Kerbempfindlichkeit mit der Festigkeit der betrachteten Stähle. Dieser Einfluss wurde auch innerhalb von Versuchsstudien festgestellt, siehe Abschnitt 6.1.9.4. Mit höherer Streckgrenze kann jedoch auch eine größere Vorspannung erreicht werden, welche die einwirkende Schwingbreite auf die Schraube deutlich verringert und ihre Ermüdungsfestigkeit damit steigert. Aus diesem Grund sind hochfestere Schrauben nach wie vor zu bevorzugen.

9.4.3 Details der Tabelle 8.3

Details of Table 8.3

Für die Überprüfung des Streckgrenzeinflusses werden im Folgenden die Details „kerbfrei bearbeiteter Stumpfstoß“ und „im Schweißzustand belassener Stumpfstoß“ betrachtet.

In Bild 9-27 sind die Ergebnisse der auf 2 Millionen Schwingspiele normierten Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Streckgrenze dargestellt.

Aufgrund der fehlenden geometrischen Kerbe, die bei kerbscharfen Details die Ermüdungsfestigkeit signifikant beeinflusst, wäre ein Streckgrenzeinfluss am ehesten für das

Detail des kerbfrei bearbeiteten Stumpfstoßes zu erwarten. Die experimentellen Ergebnisse in Bild 9-27 (a) zeigen jedoch keine entsprechenden Tendenzen.

Für das im Schweißzustand belassene Konstruktionsdetail liegt eine Vielzahl auswertbarer experimenteller Versuche mit Streckgrenzen bis zu 1100 MPa vor (vgl. Bild 9-27 (b)). Auch hier können keine Abhängigkeiten der Ermüdungsfestigkeiten von der Streckgrenze identifiziert werden.

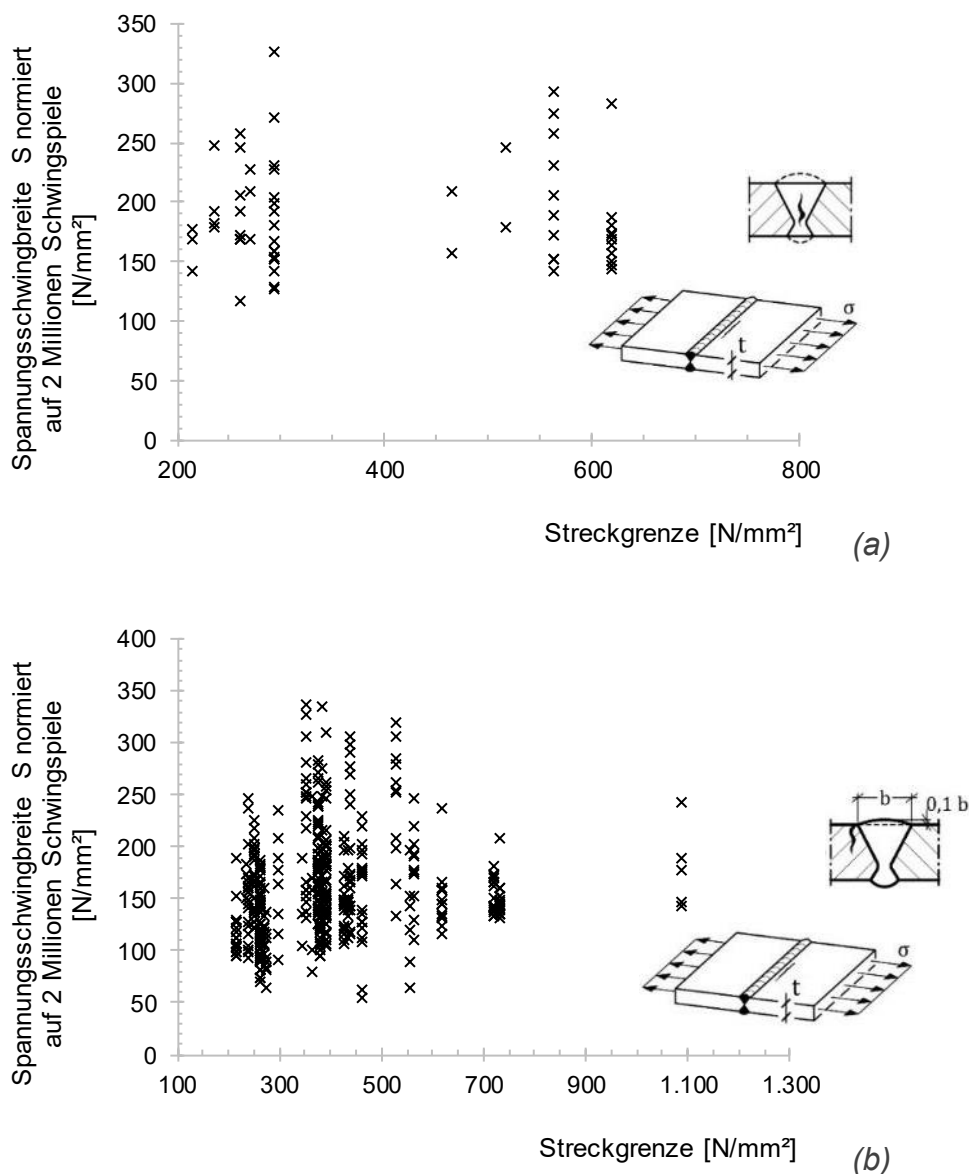
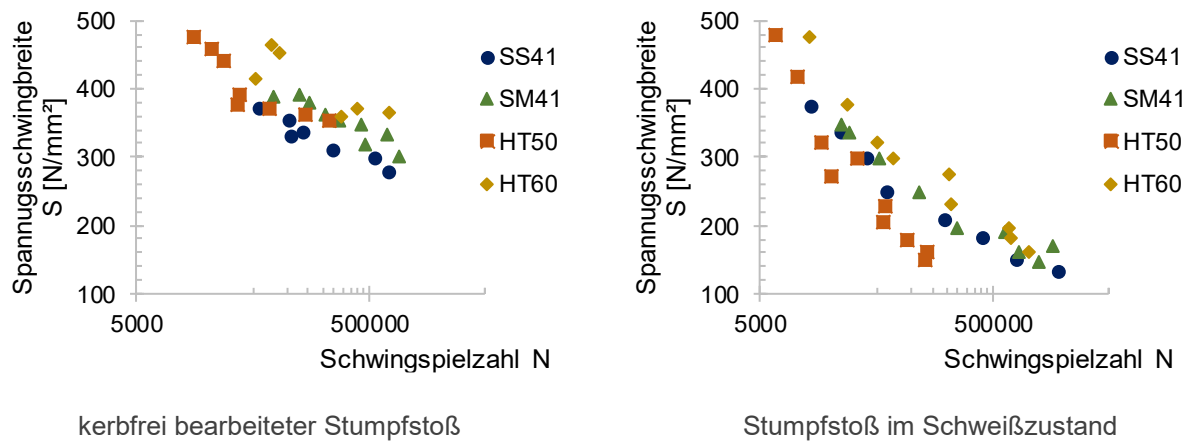


Bild 9-27: Streckgrenzeinfluss kerbfrei bearbeiteter Stumpfstoß (a) und im schweißzustand belassener Stumpfstoß (b)

Figure 9-27: Influence of yield strength for butt joint with blended weld toes (a) and butt joint as welded (b)

In [39] sind experimentelle Untersuchungen an beiden Konstruktionsdetails unter gleichbleibenden Versuchsbedingungen dokumentiert, vgl. Bild 9-28



Material:	Streckgrenze [N/mm²]:
SS41	265
SM41	294
H.T. 50	343
H.T. 60	490

Bild 9-28: Streckgrenzeneinfluss unter gleichbleibenden Randbedingungen nach [39]

Figure 9-28: Influence of yield strength for consistent test conditions according to [39]

Auch unter konsistenten Versuchsbedingungen und ohne Beeinflussung einer geometrischen Kerbe lässt sich für geschweißte Stumpfstoße keine Abhängigkeit der Streckgrenze von der Ermüdungsfestigkeit feststellen. Die Untersuchungsergebnisse stehen damit in Übereinstimmung zu den experimentellen Untersuchungen in [37], [38], [39] und [40].

9.5 Fertigungseinflüsse und weitere Effekte

Fabrication influence and additional effects

9.5.1 Übersicht

Overview

In diesem Abschnitt werden Untersuchungen zum Einfluss verschiedener weiterer Effekte auf die Ermüdungsfestigkeit vorgestellt. Oft haben Fertigungsprozess oder bestimmte Nachbehandlungs- oder Bearbeitungsmaßnahmen einen großen Einfluss auf die Ermüdung von Stahlbaudetails.

9.5.2 Details der Tabelle 8.1

Details of Table 8.1

Bei den Details der Tabelle 8.1 konnten einige zusätzliche Einflussfaktoren auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Im Fall der brenngeschnittenen Kante ohne Nachbehandlung spielt die Qualität des Brennschnitts eine große Rolle für die Ermüdungsfestigkeit. Aus diesem Grund wurde der Einfluss der Rautiefe auf die Ermüdungsfestigkeit untersucht, siehe Bild 9-29 (links). Bei vielen Untersuchungen war die Rautiefe des Brennschnitts jedoch nicht dokumentiert, sodass nur eine kleine Anzahl an Versuchsergebnissen für die Analyse betrachtet werden konnte. Es lässt sich kein Trend erkennen. Ferner wurde der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit analysiert, der etwas häufiger dokumentiert

wurde. Erwartungsgemäß zeigt sich ein abnehmender Trend der mittleren Ermüdungsfestigkeit bei Zunahme der Schnittgeschwindigkeit, durch welche die Qualität des Brennschnitts abnimmt. Es ist jedoch zu beachten, dass die Versuchswerte Proben mit unterschiedlichen Dicken beinhalten, wodurch die mögliche Schnittgeschwindigkeit beeinflusst wird.

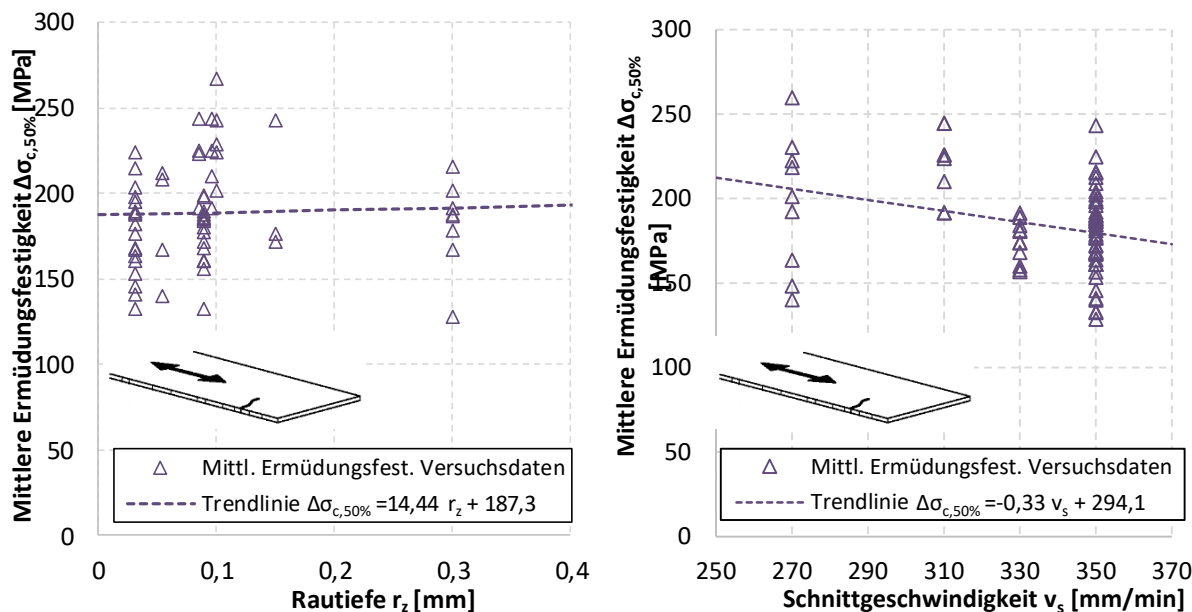


Bild 9-29: Untersuchung des Einflusses der Rautiefe (links) und der Schnittgeschwindigkeit (rechts) des Details 5 der Tabelle 8.1

Figure 9-29: Investigation of the influence roughness depth (left) of cutting speed (right) of detail 5 of Table 8.1

Ferner zeigten sich starke Einflüsse der Fertigung und Nachbehandlung bei Verbindungen und Bauteilen mit Löchern.

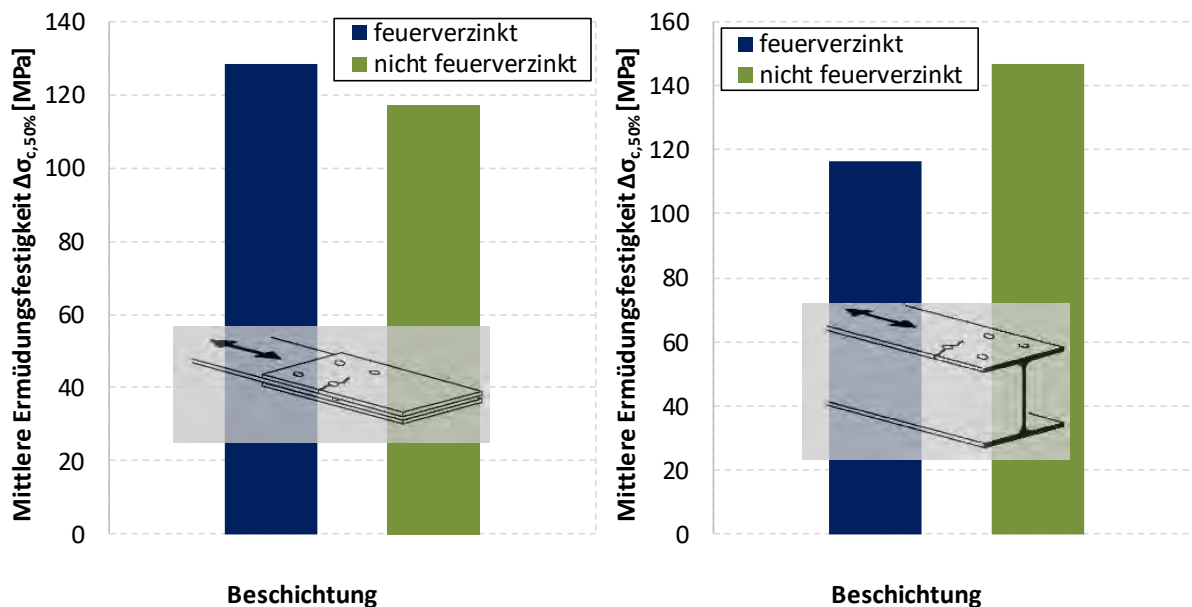


Bild 9-30: Untersuchung des Einflusses der Feuerverzinkung des Details 8 (links) und des Details 11 (rechts) der Tabelle 8.1

Figure 9-30: Investigation of the influence of hot-dip galvanizing of detail 8 (left) and detail 11 (right) of Table 8.1

Es wird allgemein angenommen, dass die Feuerverzinkung von Stahlbaudetails einen negativen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Dies zeigt sich im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen bei Detail 11, den Bauteilen mit Löchern und Detail 13, nicht vorgespannte Verbindung mit Lochspiel: Das Feuerverzinken wirkt sich bei gelochten Blechen negativ auf die Ermüdungsfestigkeit aus, siehe hierzu beispielhaft Bild 9-30 (rechts).

Im Gegensatz dazu scheint die Feuerverzinkung auf vorgespannte Verbindungen (Detail 8) keinen negativen Einfluss zu haben, da die feuerverzinkten Bleche einen höheren Reibbeiwert aufweisen, siehe Bild 9-30 (links). Eine Feuerverzinkung wird im aktuellen Kerbfallkatalog [1] nicht berücksichtigt.

Weiterhin wurde der Einfluss der Bohrlocherstellung bei gelochten Verbindungen und Bauteilen betrachtet. Bild 9-31 zeigt, dass sowohl bei der vorgespannten Verbindung (Detail 8), als auch bei dem gelochten Bauteil (Detail 11) ein Stanzen der Löcher sich ungünstiger als eine Bohrung auswirkt. Dies trifft ebenfalls auf Detail 13 zu. Aufgrund der geringen Kerbschärfe des Details 8 ist der Einfluss hier weniger signifikant als bei Detail 11. Bei Detail 11 und Detail 13 ist allerdings zu beachten, dass nach Filterung der Daten jeweils nur eine Serie mit gebohrten und eine mit gestanzten Löchern zur Auswertung herangezogen werden konnte.

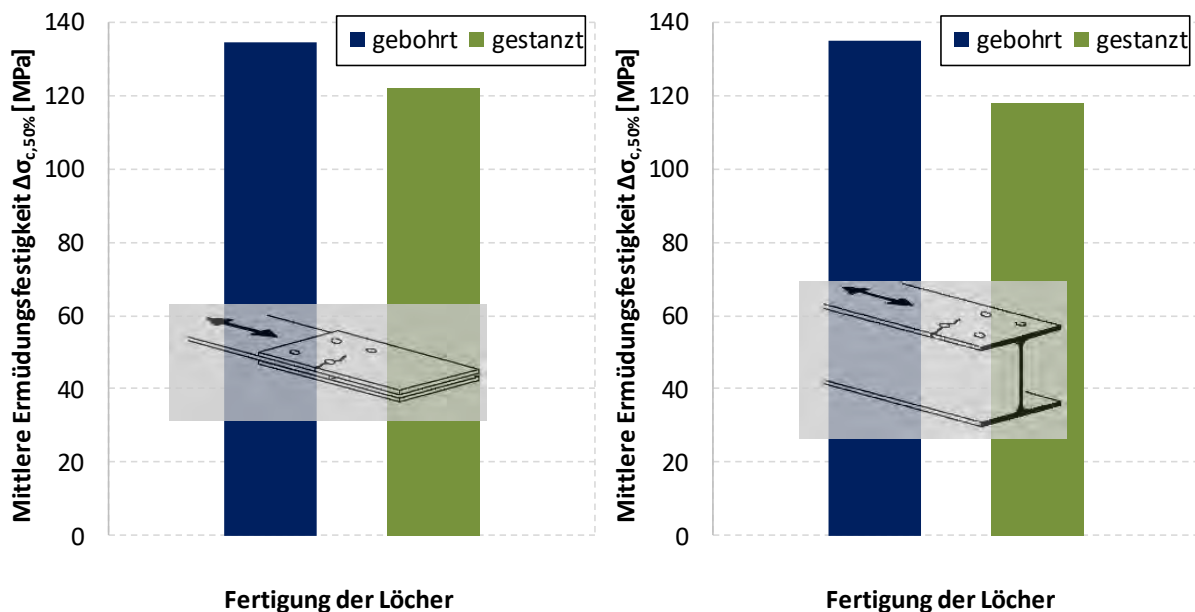


Bild 9-31: Untersuchung des Einflusses der Fertigung der Löcher des Details 8 (links) und des Details 11 (rechts) der Tabelle 8.1

Figure 9-31: Investigation of the influence of fabrication of holes of detail 8 (left) and detail 11 (right) of Table 8.1

Bei Detail 11, den gelochten Bauteilen, konnte ein weiterer Einfluss festgestellt werden. Bei diesem Detail liegt keine Verbindung vor, sondern es handelt sich um ein einfaches Bauteil mit Löchern. Eine Vorspannung wird im Versuch und bei der Kerbfallableitung nicht berücksichtigt, da das Loch nicht verschraubt ist. Es wurden jedoch Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Bohrlöcher in gelochten Bauteilen ohne Anschlussblech verschraubt und vorgespannt wurden, siehe Abschnitt 6.1.7.4. Es zeigt sich ein positiver Einfluss der Vorspannung, wie Bild 9-32 zeigt. Nicht nur die mittlere Ermüdungsfestigkeit bei 2.000.000 Zyklen steigt, sondern die wahre Neigung der Wöhlerlinie wird mit steigendem Vorspanngrad flacher.

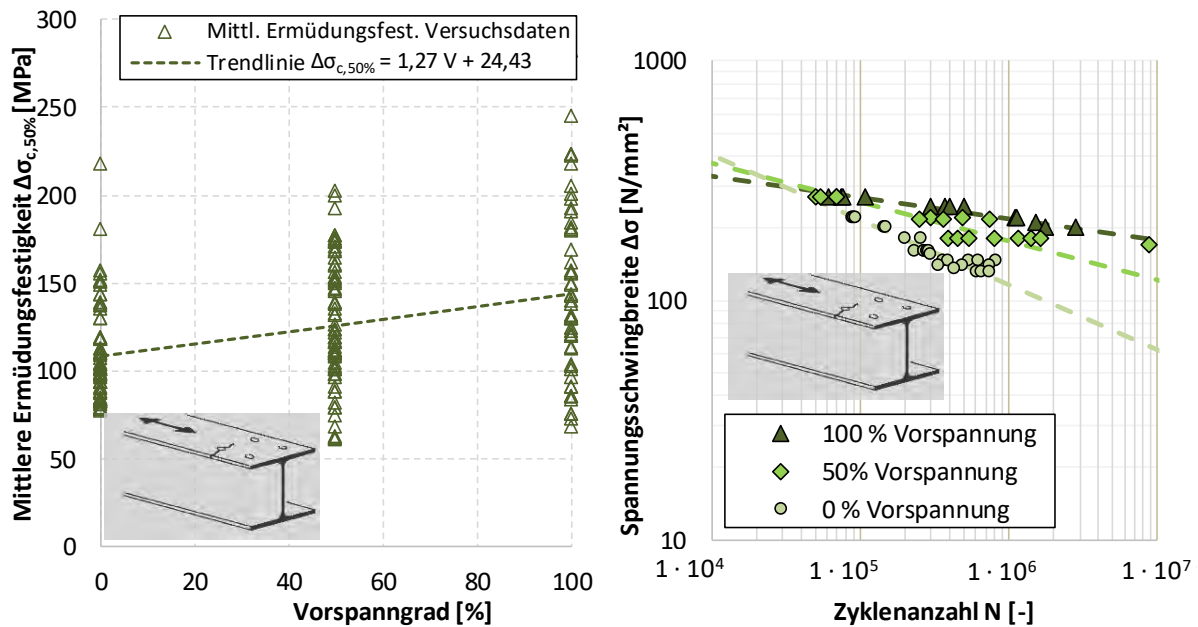


Bild 9-32: Untersuchung der Vorspannung des Details 11 der Tabelle 8.1

Figure 9-32: Investigation of the influence of prestressing of Detail 8 of Table 8.1

Es ist allerdings zu beachten, dass nach Filterung der Daten jeweils nur eine Serie je Vorspanngrad bekannt ist.

Auch bei der Schraube, Detail 14, hat die Fertigung einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit. Bild 9-33 zeigt, dass eine Feuerverzinkung generell zu niedrigeren Ermüdungsfestigkeiten führt. Dies deckt sich mit Untersuchungsergebnissen von Versuchsserien, siehe Abschnitt 6.1.9.4.

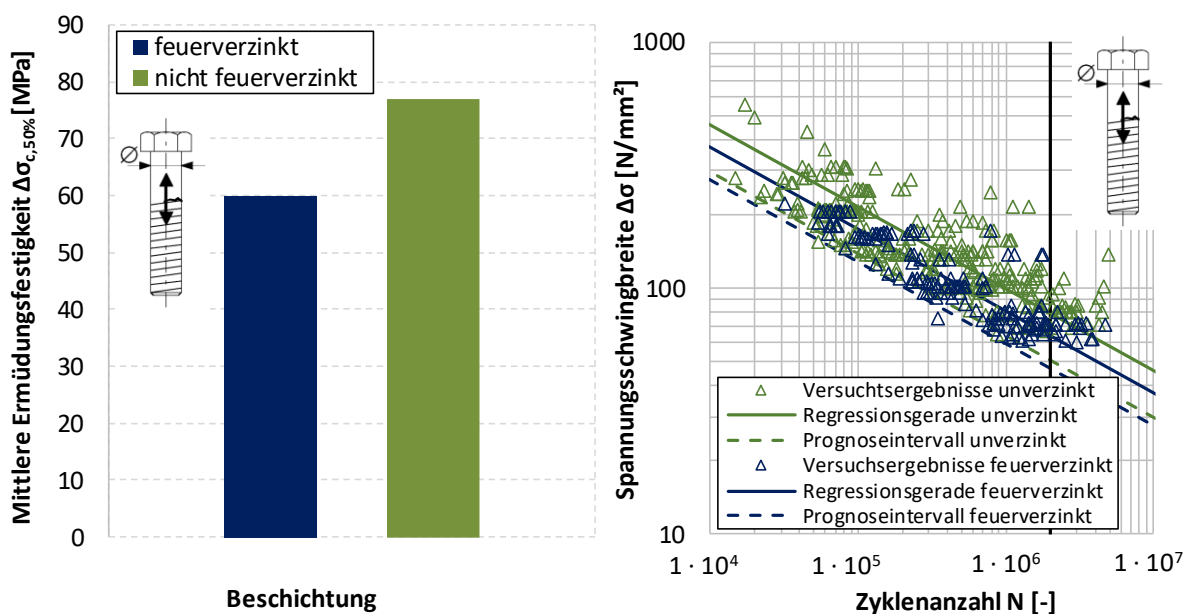


Bild 9-33: Untersuchung des Einflusses der Feuerverzinkung des Details 14 der Tabelle 8.1

Figure 9-33: Investigation of the influence of hot-dip galvanizing of detail 14 of Table 8.1

Bei einer Kerbfallableitung zeigt sich der Einfluss jedoch weniger signifikant. Bei der Auswertung aller nicht verzinkten Schrauben ergibt sich ein Kerbfall von 51, während der Kerbfall der feuerverzinkten Schrauben mit 47 nur etwas darunter liegt. Man erkennt auf

der rechten Seite von Bild 9-30, dass durch die größere Streuung der nicht feuerverzinkten Stichprobe die Differenz zwischen feuerverzinkten und nicht feuerverzinkten Schrauben durch Anwendung des Prognoseintervalls geringer wird.

Ferner wurde die Gewindeherstellung der Schrauben untersucht. Anhand Bild 9-34 lässt sich feststellen, dass Schrauben mit gewalztem Gewinde eine höhere Ermüdungsfestigkeit als jene mit geschnittenem Gewinde besitzen. Bei der Kerbfallableitung gewalzter Schrauben ergibt sich Kerbfall 56, während geschnittene Schrauben eine Ermüdungsfestigkeit von 46 MPa besitzen.

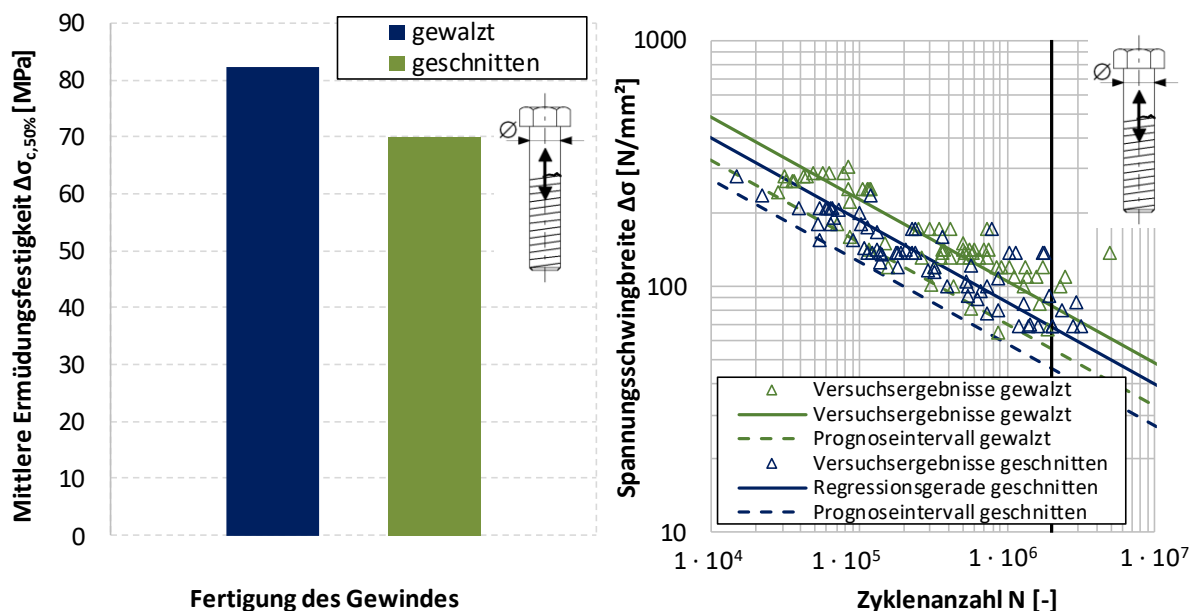


Bild 9-34: Untersuchung des Einflusses der Gewindeherstellung des Details 14 der Tabelle 8.1

Figure 9-34: Investigation of the influence of thread fabrication of detail 14 of Table 8.1

9.5.3 Details der Tabelle 8.5

Details of Table 8.5

Bei der Analyse der Versuchsdaten der Kerbdetails aus Tabelle 8.5 konnte insbesondere für diejenigen Kerbdetails mit Schweißnahtwurzelversagen ein Einfluss des Schweißverfahrens auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Exemplarisch sind hierzu für den Kreuzstoß mit Schweißnahtwurzelversagen (Kerbdetail 3) in Bild 9-35 die mittleren Ermüdungsfestigkeiten der mit unterschiedlichen Schweißverfahren hergestellten Probekörper gegenübergestellt. Die Werte der mittleren Ermüdungsfestigkeit bei 2 Mio. Schwingspielen sind auf den nominellen Nahtquerschnitt ohne Berücksichtigung eines tiefen Einbrands bezogen. Besonders die UP-geschweißten Probekörper weisen im Mittel eine signifikant höhere Lebensdauer auf. Eine Erklärung dafür liefert die in Abschnitt 6.5 bereits thematisierte prozessbedingte Einbrandtiefe, die beim UP-Verfahren bei mehreren Millimetern liegen kann. Wird der tiefe Einbrand bei der Bemessung von UP-geschweißten Nähten vernachlässigt so liegt diese auf der sicheren Seite. Dagegen sollte bei UP-geschweißten Proben, die für die Kerbfallableitung herangezogen werden, die tatsächliche Nahtdicke zur Ermittlung der Nennspannung berücksichtigt werden. Ansonsten besteht die Gefahr einer nicht konservativen Kerbfallableitung. Analog sollte auch bei MAG-Schweißungen, bei denen die tatsächliche Nahtdicke von der nominellen Nahtdicke, bspw. infolge nicht berücksichtigtem tiefen Einbrand, deutlich abweicht, stets die tatsächliche Nahtdicke für die Kerbfallableitung herangezogen werden. Bei der Dokumentation

von zukünftigen Versuchsergebnissen sollte daher sowohl die nominelle als auch die tatsächliche Nahtdicke eindeutig und nachvollziehbar dokumentiert werden.

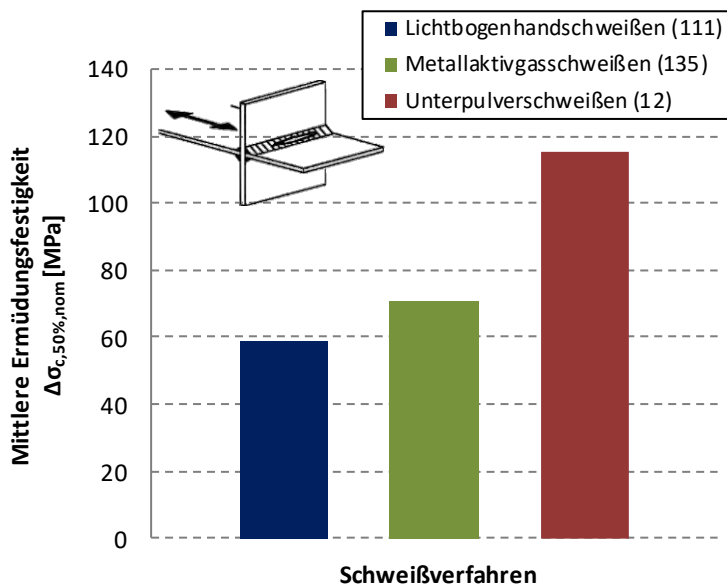


Bild 9-35: Untersuchung des Einflusses verschiedener Schweißverfahren von Detail 3 (Tabelle 8.5)

Figure 9-35: Investigation of different welding processes of detail 3 (table 8.5)

9.5.4 Details der Tabelle 8.8

Details of Table 8.8

Bei Detail 4 der Tabelle 8.8 konnte eine signifikante Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit von der Größe des Wurzelspalts festgestellt werden, die bereits bei der Kerbfallauswertung berücksichtigt wurde, siehe Bild 9-36.

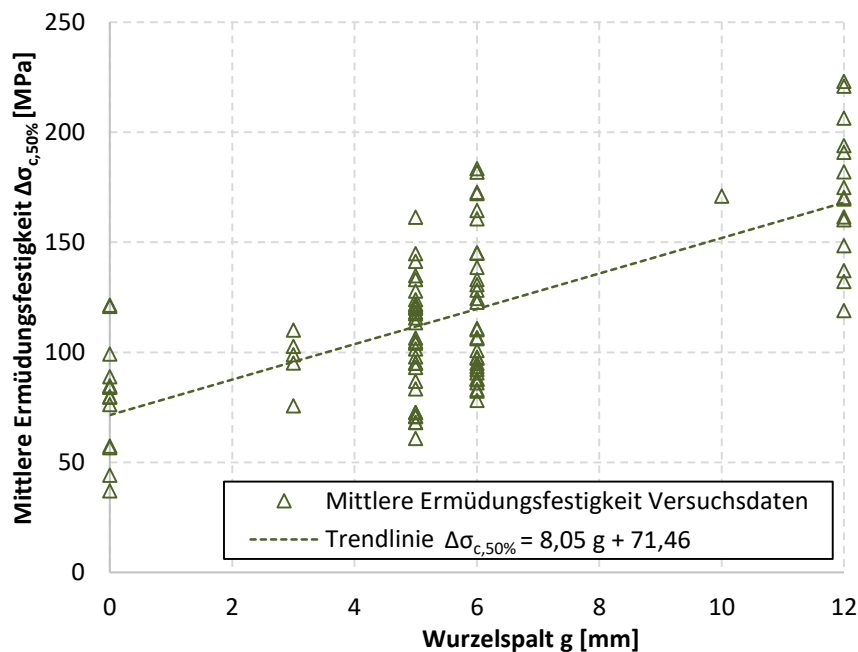


Bild 9-36: Untersuchung des Einfluss des Wurzelspalts des Details 4 der Tabelle 8.8

Figure 9-36: Investigation of influence of root gap of detail 4 of Table 8.8

10 Empfehlungen von verbesserten Kerbfalldetails

Recommendations for improved details

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus Abschnitt 6, 7, 8 und 9 zusammengefasst und als Fazit wird für jedes Detail, bei welchem Versuchsergebnisse oder andere relevante Informationen vorhanden sind, eine Kerbfallempfehlung gegeben. Änderungen im Vergleich zum Kerbfallkatalog [1] werden blau markiert und nicht nachgewiesene Informationen sind grau hinterlegt.

This section summarises the results from sections 6, 7, 8 and 9 and concludes with a recommended fatigue class for each detail where test results or other relevant information are available. Changes in comparison to the detail catalogue [1] are marked in blue and unsupported information is highlighted in grey.

10.1 Allgemeines

General

In diesem Abschnitt werden lediglich Empfehlungen für Kerbdetails gegeben, für die Versuchsergebnisse oder weitere Informationen vorliegen. Die Empfehlungen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Project Team SC3-T8 erstellt. Neue Versionen der Zeichnungen entstammen ebenfalls einem Entwurf des Project Teams [149].

10.2 Tabelle 8.1

Table 8.1

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen können die Details 2, 4, 5, 8, 9, 11, 13, 14 und 15 der Tabelle 8.1 beurteilt werden.

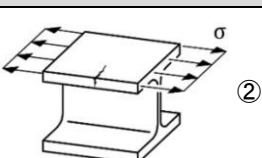
10.2.1 Gewalzte Erzeugnisse in Form von Walzprofilen - Detail 2

Rolled sections – Detail 2

In Untersuchungen aus Kapitel 6.1.2 konnte Kerbfall 160 für das Walzprofil bestätigt werden. Wie in Kapitel 9 beschrieben ist, lassen sich keine Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit feststellen, die signifikant genug für eine Integration in den Kerbfallkatalog wären. Die Reduzierung der Spannungsschwingbreite im Druckbereich wird als unbedenklich angesehen. Tabelle 10-1 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-1: Kerbfallempfehlung Detail 2

Table 10-1: Detail recommendation detail 2

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160		Gewalzte oder extrudierte Erzeugnisse unter Normalspannung: ② Walzprofile mit gewalzten Kanten	Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.

10.2.2 Maschinell gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung – Detail 4

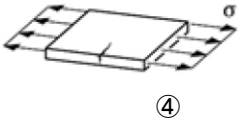
Machine gas cut or sheared material with subsequent dressing – Detail 4

In Untersuchungen aus Kapitel 6.1.3 konnte mit $m = 5$ der Kerbfall 160 für die maschinell brenngeschnittene Kante mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung abgeleitet werden. Dies stellt eine Verbesserung von Kerbfall 140 auf 160 dar mit einer Änderung der inversen Steigung der Wöhlerlinie von $m = 3$ auf $m = 5$.

Wie in Kapitel 9 beschrieben ist, lässt sich ein Streckgrenzeinfluss auf die Ermüdungsfestigkeit erkennen, der jedoch nicht signifikant genug für eine Integration in den Kerbfallkatalog ist. Die Reduzierung der Spannungsschwingbreite im Druckbereich wird als unbedenklich angesehen. Tabelle 10-2 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-2: Kerbfallempfehlung Detail 4

Table 10-2: Detail recommendation detail 4

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160 $m = 5$		Gescherte oder brenngeschnittene Bleche: ④: Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung	Alle sichtbaren Randkerben sind zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen. Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z.B. Schleifen) müssen parallel zu den Spannungen verlaufen. Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq 1/4$) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen. Keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut

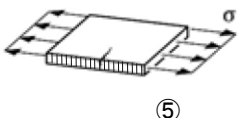
10.2.3 Gescherte oder brenngeschnittene Bleche mit Brennriefen oder von Hand geschnittene und mechanisch bearbeitete Bleche – Detail 5

Material with machine gas cut edges having shallow and regular drag lines or manual gas cut material, subsequently dressed – Detail 5

In Untersuchungen aus Kapitel 6.1.4 konnte der Kerbfall 140 für die brenngeschnittenen Bleche mit Brennriefen bzw. für von Hand geschnitten und nachträglich bearbeitete Bleche abgeleitet werden. Dies stellt eine Verbesserung von Kerbfall 125 auf 140 dar. Die Wöhlerlinie sollte jedoch durch Kerbfall 160 mit $m = 5$ des Details 4 nach oben begrenzt werden. Aus Abschnitt 6.1.4 geht hervor, dass die Qualität des Brennschnitts einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Jedoch konnte anhand der Feststellungen aus Kapitel 9 keine quantitative Größe gefunden werden, mit welcher auf Grundlage der vorhandenen Versuchsbasis eine Anforderung abgeleitet werden kann. Die Reduzierung der Spannungsschwingbreite im Druckbereich wird als unbedenklich angesehen. Tabelle 10-3 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-3: Kerbfallempfehlung Detail 5

Table 10-3: Detail recommendation detail 5

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
140#		Gescherte oder brenngeschnittene Bleche: ⑤: Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennriefen oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung. Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.	Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq 1/4$) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen. Keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut

140#: Jedoch durch $\Delta\sigma_c = 160$ mit $m = 5$ nach oben begrenzt

10.2.4 Symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben – Detail 8

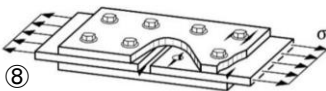
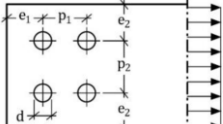
Double covered symmetrical joint with preloaded bolts – Detail 8

In Untersuchungen aus Kapitel 6.1.5 konnte der Kerbfall 112 für die symmetrische zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben mit der inversen Steigung $m = 5$ abgeleitet werden. Der Kerbfall stimmt mit dem bisherigen Kerbfalkatalog überein, wobei die inverse Steigung von $m = 3$ auf $m = 5$ geändert wird.

Anhand der Feststellungen aus Kapitel 9 wurde eine Streckgrenzenabhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit festgestellt. Dem wird durch die Verwendung des Kerbfalls 125 bei der Verwendung der Stahlgüte S460 Rechnung getragen. Der Einfluss der Feuerverzinkung wird nicht als signifikant eingestuft, sodass eine Feuerverzinkung konservativer Weise nicht berücksichtigt wird. Ferner wird in der Beschreibung ergänzt, dass die Vorspannung 100% betragen muss. Tabelle 10-4 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-4: Kerbfallempfehlung Detail 8

Table 10-4: Detail recommendation detail 8

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
112 $m = 5$		⑧ Symmetrische zweischnittige Verbindung mit hochfesten 100% vorgespannten Schrauben oder 100% vorgespannten Injektions-schrauben	<p>$\Delta\sigma$ ist am Bruttoquerschnitt aller Bleche zu ermitteln, die eine Stelle mit möglicher Rissbildung enthalten. Bei der Verwendung von S460 darf Kerbfall 125 verwendet werden.</p> <p>Einhaltung folgender Lochabstände:</p>  <p> $e_1 \geq 1,5d$ $e_2 \geq 1,5d$ $p_1 \geq 2,5d$ $p_2 \geq 2,5d$ </p>

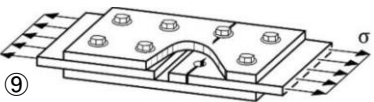
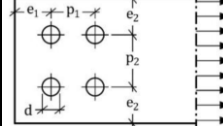
10.2.5 Zweischnittige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektions-schrauben – Detail 9

Double covered joint with fitted or non-preloaded injection bolts – Detail 9

In Untersuchungen aus Kapitel 6.1.6 konnte der Kerbfall 80 für zweischnittige Verbindung mit Pass- oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben abgeleitet werden, was leicht unter den bisherigen Kerbfall 90 für dieses Detail liegt. Es wurden anhand der vorhandenen Datenbasis keine signifikanten Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt. Tabelle 10-5 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-5: Kerbfallempfehlung Detail 9

Table 10-5: Detail recommendation detail 9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
80		⑨: Zweischnittige Verbindung mit Passschrauben oder mit nicht vorgespannten Injektionsschrauben	<p>$\Delta\sigma$ ist am Nettoquerschnitt aller Bleche zu ermitteln, die eine Stelle mit möglicher Rissbildung enthalten.</p> <p>Einhaltung folgender Lochabstände:</p>  <p> $e_1 \geq 1,5d$ $e_2 \geq 1,5d$ $p_1 \geq 2,5d$ $p_2 \geq 2,5d$ </p>

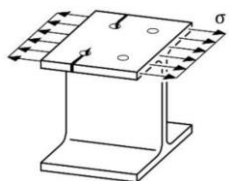
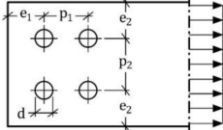
10.2.6 Bauteile mit Löchern – Detail 11

Structural elements with holes – Detail 11

In Untersuchungen aus Kapitel 6.1.7 konnte der Kerbfall 90 für Bauteile mit Löchern bestätigt werden. Wie in Kapitel 9 beschrieben ist, lassen sich keine Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit feststellen, die signifikant genug für eine Integration in den Kerbfallkatalog wären. Eine Feuerverzinkung sollte nicht zugelassen werden. Ferner wird bei der Beschreibung die Belastungssituation durch den Term „Biegung und/oder Normalkraft“ statt „Biegung und Normalkraft“ richtiggestellt. Tabelle 10-6 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-6: Kerbfallempfehlung Detail 11

Table 10-6: Detail recommendation detail 11

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
90		⑪: Bauteile mit Lochspiel unter Biegung <u>und/oder</u> Normalkraft	$\Delta\sigma$ ist am Nettoquerschnitt zu ermitteln. Einhaltung folgender Lochabstände:  $e_1 \geq 1,5d$ $e_2 \geq 1,5d$ $p_1 \geq 2,5d$ $p_2 \geq 2,5d$

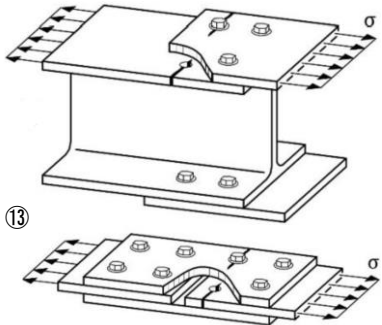
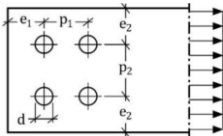
10.2.7 Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben – Detail 13

Connection with non-preloaded bolts in normal clearance holes – Detail 13

In Untersuchungen aus Kapitel 6.1.8 konnte der Kerbfall 50 für die einschnittige oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben bestätigt werden. Wie in Kapitel 9 beschrieben ist, lassen sich keine Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit feststellen, die signifikant genug für eine Integration in den Kerbfallkatalog wären. Eine Feuerverzinkung sollte nicht zugelassen werden. Tabelle 10-7 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-7: Kerbfallempfehlung Detail 13

Table 10-7: Detail recommendation detail 13

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
50		⑬: Einschnittige <u>gestützte</u> oder symmetrische zweischnittige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben. Keine Lastumkehr.	$\Delta\sigma$ ist am Nettoquerschnitt <u>aller Bleche zu ermitteln, die eine Stelle mit möglicher Rissbildung enthalten.</u> Einhaltung folgender Lochabstände:  $e_1 \geq 1,5d$ $e_2 \geq 1,5d$ $p_1 \geq 2,5d$ $p_2 \geq 2,5d$

10.2.8 Schrauben und Gewindestangen unter Zug – Detail 14

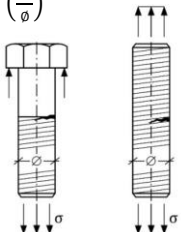
Bolts and rods in tension – Detail 14

In Untersuchungen aus Kapitel 6.1.9 konnte der Kerbfall 50 für Schrauben und Gewindestangen unter Zug bestätigt werden. Wie in Kapitel 9 beschrieben ist, weist die vorhan-

dene Datenbasis auf eine abnehmende Ermüdungsfestigkeit mit steigendem Schraubendurchmesser hin, sodass die Größenabhängigkeit des bisherigen Kerbfallkatalogs erhalten bleiben sollte. Weiterhin wurde, wie in Abschnitt 9.5 dokumentiert, eine signifikante Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit von der Gewindefertigung festgestellt. Schrauben mit gerolltem Gewinde besitzen eine größere Ermüdungsfestigkeit als jene mit geschnittenem Gewinde. Diese Abhängigkeit wird in die Kerbfallempfehlung integriert. Des Weiteren wird im Text die Anforderung ergänzt, dass Schraubenspannungsschwingbreiten infolge Abstützkräften mittels numerischer Berechnung oder analytischer Modelle zu berechnen sind. Tabelle 10-8 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-8: Kerbfallempfehlung Detail 14

Table 10-8: Detail recommendation detail 14

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
56	Größenabhängigkeit für $\varnothing > 30$ mm: $k_s = \left(\frac{30}{\varnothing}\right)^{0,25}$ 	(14): <u>Schrauben und Gewindestangen unter Zug:</u> gerolltes Gewinde	$\Delta\sigma$ ist am Spannungsquerschnitt zu ermitteln. Biegung und Zug infolge Abstützkräften sowie weitere Biegespannungen sind <u>mittels numerischer Berechnung oder analytischer Modelle</u> zu berücksichtigen. Bei vorgespannten Schrauben darf die reduzierte Spannungsschwingbreite berücksichtigt werden.
45		geschnittenes Gewinde	

10.2.9 Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen – Detail 15

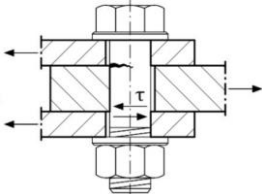
Bolts in shear – Detail 15

In Untersuchungen aus Kapitel 6.1.10 konnte der Kerbfall 140 für Schrauben in Scher-Lochleibungsverbindungen abgeleitet werden. Da die Datenbasis allerdings sehr beschränkt ist, scheint eine Hochstufung des Details um zwei Kerbfallklassen bedenklich, sodass weiterhin Kerbfall 100 empfohlen wird. Es wurden anhand der vorhandenen Datenbasis keine signifikanten Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt.

Ferner werden die Anforderung an das Detail, die bisher in der Beschreibung zu finden waren, in das Feld „Anforderung“ verschoben: Das Gewinde darf nicht in der Scherfläche liegen. Die Pluralform der Scherfläche wird ergänzt. Tabelle 10-9 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-9: Kerbfallempfehlung Detail 15

Table 10-9: Detail recommendation detail 15

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
100 $m = 5$		(15): <u>Schrauben in ein- oder zweischnittigen Scher-Lochleibungsverbindungen</u> – Passschrauben – Schrauben ohne Lastumkehr	$\Delta\tau$ ist am Schaftquerschnitt zu ermitteln. Das Gewinde darf nicht in der Scherfläche bzw. den Scherflächen liegen. Die Schrauben sollten den Güten 5.6, 8.8 oder 10.9 nach EN 1993-1-8 genügen.

10.3 Tabelle 8.2

Table 8.2

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen können die Details 2, 3, 5, 8, 9, 10 und 11 der Tabelle 8.2 beurteilt werden.

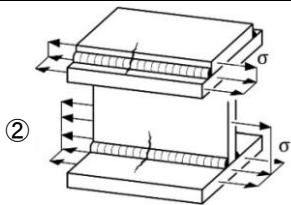

10.3.1 Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen – Detail 2

Automatic fillet welds without stop/start positions – Detail 2

In Untersuchungen aus Kapitel 6.2.2 konnte der Kerbfall 125 für mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Kehlnähte ohne Ansatzstellen bestätigt werden. Wie in Kapitel 9 beschrieben ist, lassen sich keine Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit feststellen, die signifikant genug für eine Integration in den Kerbfalkatalog wären. In der Beschreibung werden nun „Doppelkehlnähte“ erwähnt. Der Hinweis auf den Ermüdungsnachweis von Gurtplattenenden wird vom Feld „Beschreibung“ in das Feld „Anforderungen“ verschoben. Informationen zu Reparaturschweißungen werden separat bei Detail 7 der Tabelle 8.2 aufgeführt. Tabelle 10-10 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-10: Kerbfallempfehlung Detail 2

Table 10-10: Detail recommendation detail 2

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
125			②: Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte .	Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Detail ⑥ oder ⑦ in Tabelle 8.5 nachzuweisen.

10.3.2 Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte mit Ansatzstellen – Detail 3

Automatic fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions – Detail 3

In Untersuchungen aus Kapitel 6.2.3 konnte der Kerbfall 125 für mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte ohne Ansatzstellen abgeleitet werden. Jedoch bleibt das Vorhandensein von Ansatzstellen bei einigen Serien unklar. Aus diesem Grund wird weiterhin Kerbfall 112 empfohlen. Wie in Kapitel 9 beschrieben ist, lassen sich keine Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit feststellen, die signifikant genug für eine Integration in den Kerbfalkatalog wären. Der Hinweis auf den Ermüdungsnachweis von Gurtplattenenden wird ergänzt. Tabelle 10-11 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-11: Kerbfallempfehlung Detail 3

Table 10-11: Detail recommendation detail 3

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
112			③: Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte, beide mit Ansatzstellen.	Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Detail ⑥ oder ⑦ in Tabelle 8.5 nachzuweisen.

10.3.3 Handgeschweißte Kehlnähte oder HV-Nähte oder DHV-Nähte – Detail 5

Manual fillet or butt weld – Detail 5

In Untersuchungen aus Kapitel 6.2.4 konnte der Kerbfall 112 für handgeschweißte Doppelkehlnähte oder handgeschweißte beidseitig durchgeschweißte Nähte abgeleitet werden. Dies stellt eine Verbesserung von Kerbfall 100 auf 112 dar. Wie in Kapitel 9 beschrieben ist, lassen sich keine Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit feststellen, die signifikant genug für eine Integration in den Kerbfallkatalog wären. Der Hinweis auf den Ermüdungsnachweis von Gurtplattenenden wird ergänzt. Die im bisherigen Kerbfallkatalog vorhandenen Anforderungen „Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Passgenauigkeit erforderlich. Dabei ist bei HV-Nähten das Stegblech so anzuschrägen, dass die Wurzel ausreichend und ohne Herausfließen von Schweißgut erfasst werden kann“ wurde ursprünglich aus [8] übernommen, galt damals jedoch nur für Hohlkästen. Aus diesem Grund wird auf diese Anforderung verzichtet. Tabelle 10-12 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-12: Kerbfallempfehlung Detail 5

Table 10-12: Detail recommendation detail 5

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
112			⑤: Handgeschweißte Doppelkehlnähte oder handgeschweißte beidseitig durchgeschweißte Nähte	Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Detail ⑥ oder ⑦ in Tabelle 8.5 nachzuweisen.

10.3.4 Von Hand oder automatisch einseitig durchgeschweißte Nähte, speziell bei Hohlkästen – Detail 6

Manual or automatic butt welds carried out from one side only, particularly for box girders – Detail 6

Zum Detail 6, Längsnähten bei Hohlkästen, sind keine Versuchsergebnisse bekannt. Bei diesem Detail fällt jedoch auf, dass auf dem Bild in der DIN EN 1993-1-9 [1] Kehlnähte abgebildet sind, während in der Beschreibung von durchgeschweißten Nähten die Rede ist. Da Kehlnähte jedoch praxisrelevanter sind und sich in der Vergangenheit bewährt haben, wird vorgeschlagen, Kehlnähte bei diesem Detail ebenfalls zuzulassen. Dies sollte zukünftig jedoch abschließend geklärt werden.

10.3.5 Ausgebesserte automatisch oder handgeschweißte Kehlnähte oder Stumpfnähte – Detail 7

Repaired automatic or manual fillet or butt welds – Detail 7

Zum Detail 7, Reparaturschweißungen, sind keine Versuchsergebnisse bekannt. Im Vergleich zum bisherigen Kerbfall wird hier die Formulierung konkreter ausgedrückt: Reparierte Schweißnähte sind generell Kerbfall 100 zuzuordnen, es sei denn, die Schweißnahtübergänge werden geschliffen. Im letzteren Fall trifft der ursprüngliche Kerbfall zu.

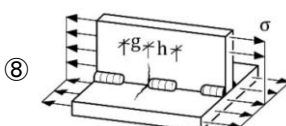

10.3.6 Unterbrochene Längsnähte – Detail 8

Intermittent longitudinal fillet welds – Detail 8

In Untersuchungen aus Kapitel 6.2.5 konnte der bisherige Kerbfall 80 für unterbrochenen Längsnähte nicht bestätigt werden. Vielmehr trifft Kerbfall 71 zu. Es konnten anhand der vorhandenen Datenbasis keine Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. In den Anforderungen wird als Ort der Spannung statt der Bezeichnung „Flansch“ „Grundmaterial“ verwendet, um eine Allgemeingültigkeit zu gewährleisten. Tabelle 10-13 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-13: Kerbfallempfehlung Detail 8

Table 10-13: Detail recommendation detail 8

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
71			⑧: Unterbrochene Längsnähte.	$\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Grundmaterial berechnet.

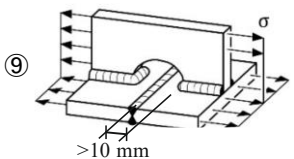
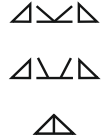
10.3.7 Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten – Detail 9

Longitudinal butt weld, fillet weld or intermittent weld with a cope hole – Detail 9

In Untersuchungen aus Kapitel 6.2.6 konnte der bisherige Kerbfall 71 für Längsnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten bestätigt werden. Es konnten anhand der vorhandenen Datenbasis keine Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. In der Beschreibung wird das Wort „Längsnähte“ durch „Stumpfnähte“ ersetzt, um die Übereinstimmung mit der englischen Version (butt welds) zu gewährleisten. In den Anforderungen wird als Ort der Spannung statt der Bezeichnung „Flansch“ „Grundmaterial“ verwendet, um eine Allgemeingültigkeit zu gewährleisten. In den Anforderungen wird außerdem erwähnt, dass die Längsnaht rundum den Freischnitt geschweißt werden muss. Der Abstand zwischen Stumpfnäht und umschweißter Naht sollte mindestens 10 mm betragen. Zudem wird ergänzt, dass die quer laufende Stumpfnäht nach Tabelle 8.3 nachzuweisen ist. Tabelle 10-14 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-14: Kerbfallempfehlung Detail 9

Table 10-14: Detail recommendation detail 9

Kerb-fall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
71			⑨: Stumpfnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten (kleiner 60 mm). Bei Freischnitten > 60 mm gilt Detail ① in Tabelle 8.4.	⑨: $\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Grundmaterial berechnet. Längsnaht rundum den Freischnitt geschweißt. Die quer laufende Stumpfnah sollte nach Tabelle 8.3 nachgewiesen werden.

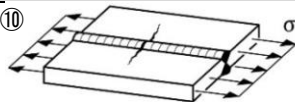


10.3.8 Längsbeanspruchte Stumpfnah – Detail 10

Longitudinal butt weld – Detail 10

In Untersuchungen aus Kapitel 6.2.7 konnte der bisherige Kerbfall 125 für längsbeanspruchte Stumpfnähte der höchsten Kerbfallkategorie (beidseitig in Lastrichtung blecheben geschliffen, ohne Ansatzstellen) bestätigt werden. Die Auswertung der Stumpfnähte der nächst schlechteren Ausführungsvariante (ohne Ansatzstellen) liefert ebenfalls Kerbfall 125. Dies basiert jedoch auf einer einzigen Sekundärquelle, welche kaum Informationen enthält. Dementsprechend wird weiterhin Kerbfall 112 empfohlen. Die dritte Kategorie der Stumpfnähte (mit Ansatzstellen) kann nicht beurteilt werden. Es konnten anhand der vorhandenen Datenbasis keine Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. In der Beschreibung wird für Kerbfall 125 „ohne Ansatzstellen“ ergänzt, was bisher lediglich implizit durch die Erwähnung der Ansatzstellen bei Kerbfall 90 gegeben war. Die Anforderung an die zerstörungsfreie Prüfung wird nun im Feld „Anforderungen“ mit Regelungen der EN 1090-2 [99] verknüpft. Tabelle 10-15 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-15: Kerbfallempfehlung Detail 10

Table 10-15: Detail recommendation detail 10

Kerb-fall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
125			⑩: Stumpfnah, beidseitig in Lastrichtung blecheben geschliffen, ohne Ansatzstellen	Umfang der ZFP nach EN 1090-2: 100%
112			Wie zuvor, ohne Schleifen	
90			Wie zuvor, mit Ansatzstellen	

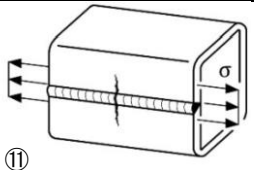
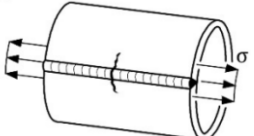
10.3.9 Automatisch geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen – Detail 11

Automatic longitudinal seam weld in hollow section – Detail 11

In Untersuchungen aus Kapitel 6.2.8 konnte keine zuverlässige Kerbfallbewertung für Längsnahte in Hohlprofilen abgeleitet werden. Tabelle 10-16 zeigt die Kerbfallempfehlung, die sich an bisherigen Kerbfällen orientiert.

Tabelle 10-16: Kerbfallempfehlung Detail 11

Table 10-16: Detail recommendation detail 11

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
140		II: Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen nach EN 10210 oder EN 10219	Wanddicke $t \leq 12,5 \text{ mm}$
125			Wanddicke $t > 12,5 \text{ mm}$
90		Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnaht in Hohlprofilen mit Ansatzstellen	

10.4 Tabelle 8.3: Stumpfstöße (durchgeschweißt)

Table 8.3: Butt welds (full penetration)

10.4.1 Übersicht

Overview

Die Erstellung der Tabelle erfolgte in Zusammenarbeit mit Hr. Dr. Mathias Euler (Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart) der im Project Team SC3-T8 für die Überarbeitung der Kerbfalltabellen in DIN EN 1993-1-9 [1] verantwortlich ist.

10.4.2 Stumpfstöße von Blechen und Trägern

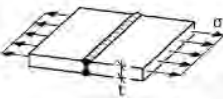

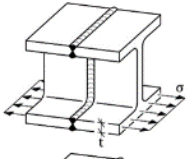

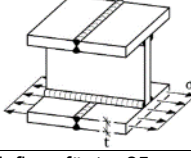
Transverse splices of plates and girders

In Tabelle 10-17 sind die Kerbfallempfehlungen für Stumpfstöße dargestellt. Die Auswertung für kerbfrei bearbeitete Stumpfstöße in Kapitel 6.3.2 zeigt, dass die Ermüdungsfestigkeit auf Kerbfall 125 hochgesetzt werden kann. Für im Schweißzustand belassene Stumpfstöße zeigte die Analyse der Daten in 9.2.4.2, dass insbesondere der Winkel des Schweißnahtanstiegs für die Ermüdungsfestigkeit verantwortlich ist. Für eine einfachere Anwendbarkeit wird die alte Regelung in Abhängigkeit der Schweißnahtüberhöhung übernommen.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen zudem, dass die Ermüdungsfestigkeiten zwischen Blechen, geschweißten Trägern und gewalzten Trägern vergleichbar sind. Entsprechend Tabelle 10-17 wird eine einheitliche Bewertung empfohlen.

Tabelle 10-17: Kerbfallvorschlag Stumpfstoß

Table 10-17: Proposal of fatigue detail: Transverse splices

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
125			kerbfrei bearbeiteter Stumpfstoß	kerbfrei bearbeitete Stumpfnahte in Blechen gleicher Dicke Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen
90			Stumpfstoß mit Schweißnahtüberhöhung ≤ 10%	Schweißnahtanstiegswinkel ≥ 150° Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen
80			Stumpfstoß mit Schweißnahtüberhöhung ≤ 20%	Schweißnahtanstiegswinkel ≥ 110° Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen

Blechkeneinfluss für $t \geq 25$ mm muss berücksichtigt werden mit Erhöhungsfaktor $k_s = (25/t)^{0,2}$, dabei ist t die Dicke des dünneren Blechs.

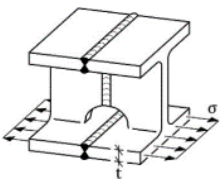



10.4.3 Vollstöße von Walzprofilen mit Freischnitt

Full cross section butt welds of rolled sections with cope holes

Die Auswertungen in Kapitel 6.3.6 zeigen, dass dieses Konstruktionsdetail aufgrund der zusätzlichen Kerbe am Freischnitt eine niedrigere Ermüdungsfestigkeit aufweist als durchgeschweißte Walzprofile. Aufgrund der zusätzlichen Kerbe wird das Detail niedriger als das in Tabelle 10-17 vorgeschlagene Detail eingestuft. Für den Vorschlag in Tabelle 10-18 wird die aktuelle Kerbfallbewertung in DIN EN 1993-1-9 [1] übernommen:

Tabelle 10-18: Kerbfallvorschlag Vollstöße von Walzprofilen mit Freischnitt

Table 10-18: Proposal of fatigue detail: Transverse splices

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
90			Vollstöße von Walzprofilen mit Freischnitt, Nahtübergänge kerbfrei bearbeitet	kerbfrei bearbeitete Stumpfnahte in Blechen gleicher Dicke
80			Wie oben mit Schweißnahtüberhöhung ≤ 10%	Schweißnahtanstiegswinkel ≥ 150° Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen Versatz ≤ 5% der Platten dicke

Blechkeneinfluss für $t \geq 25$ mm muss berücksichtigt werden mit Erhöhungsfaktor $k_s = (25/t)^{0,2}$, dabei ist t die Dicke des dünneren Blechs.

10.4.4 Stumpfstoße mit Schweißbadsicherung

Transverse splices with backing

Für die Konstruktionsdetails der Stumpfstoße mit Schweißbadsicherung ist eine breite Versuchsbasis vorhanden. Die experimentellen Untersuchungen wurden für Details mit verbleibender Schweißbadsicherung (vgl. Kapitel 6.3.9) und temporärer, keramischer Schweißbadsicherung (vgl. Kapitel 6.3.8) getrennt durchgeführt. Für verbleibende Stumpfnahte wird in DIN EN 1993-1-9 [1] eine zusätzliche Anforderung hinsichtlich der Befestigung der Schweißbadsicherung formuliert. Diese wird für die Kerbfallempfehlung in Tabelle 10-19 übernommen.

Die statistische Auswertung ergibt für beide Konstruktionsdetails Ermüdungsfestigkeiten über Kerbfall 80. Daher wird eine Hochstufung des Details mit verbleibender Schweißbadsicherung empfohlen.

Tabelle 10-19: Kerbfallvorschlag Stumpfstoß mit Schweißbadsicherung

Table 10-19: Proposal of fatigue detail: Transverse splices with backing

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80			Stumpfstoß: einseitig geschweißt mit verbleibender Schweißbadsicherung	Die Heftnaht muss innerhalb der späteren Stumpfnaht liegen. Der Abstand e_p muss so gewählt werden, dass kein Aufschmelzen der Blechkanten eintreten kann.
50			Wie oben ohne Anforderung an die Heftnähte	/
Blechkeneinfluss für $t \geq 25$ mm muss berücksichtigt werden mit Erhöhungsfaktor $k_s = (25/t)^{0,2}$, dabei ist t die Dicke des dünneren Blechs.				

10.4.5 Stumpfstoße, einseitig ohne Schweißbadsicherung

Transverse splices, welded from one side without backing strip

Für das Konstruktionsdetail sind eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen bekannt, vgl. Kapitel 6.3.7. Eine statistische Auswertung ist aufgrund der starken Streuung der Versuchsergebnisse nicht möglich. Der im aktuellen DIN EN 1993-1-9 [1] gegebene Kerbfallvorschlag wird jedoch als geeignet angesehen. Ist eine Kontrolle der Nahtwurzel nicht möglich, wird entsprechend Tabelle 10-20 die niedrigste Einstufung, Kerbfall 36, empfohlen.

Können Schweißnahtunregelmäßigkeiten an der Wurzel durch Inspektion ausgeschlossen werden, wird Kerbfall 71 empfohlen. Ein Großteil der in Kapitel 6.3.7 zusammengestellten experimentellen Untersuchungen liefert Ermüdungsfestigkeiten oberhalb von Kerbfall 71.

Tabelle 10-20: Kerbfallvorschlag Stumpfstoß, einseitig ohne Schweißbadsicherung

Table 10-20: Proposal of fatigue detail: Transverse splices, welded from one side without backing strip

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
71			Stumpfstoße einseitig geschweißt	Inspektion der Wurzel-lage durch geeignete Prüfverfahren
36		/		
Blechkeneinfluss für $t \geq 25$ mm muss berücksichtigt werden mit Erhöhungsfaktor $k_s = (25/t)^{0,2}$, dabei ist t die Dicke des dünneren Blechs.				

10.4.6 Stumpfstoße mit Geometrieänderung in Breite oder Dicke

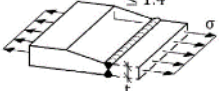

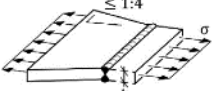

Transverse splices tapered in width or in thickness

Die in Kapitel 6.3.4 zusammengetragenen bekannten Versuchsergebnisse stammen aus nur einer Quelle. Die Versuchsergebnisse weisen darauf hin, dass die Ermüdungsfestigkeit für die im Schweißzustand belassenen Versuchskörper etwas tiefer liegt als für Konstruktionsdetails ohne Geometrieänderung. Es erfolgte dabei keine Korrektur der Nennspannung infolge der Exzentrizität. Die Details werden in Tabelle 10-21 aus diesem Grund

eine Kerbfallstufe niedriger bewertet, als die Variante ohne Geometrieänderung, vgl. Tabelle 10-17.

Tabelle 10-21: Kerbfallvorschlag Stumpfstoß mit Geometrieänderung in Breite oder Dicke

Table 10-21: Proposal of fatigue detail: Transverse splices tapered in width or thickness

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
112			kerbfrei bearbeitete Stumpfstoße mit Geometrieänderung, Übergang 1:4,	Die Nennspannung wird im dünneren Blech ermittelt
80			Stumpfstoß mit Schweißnahtüberhöhung ≤ 10%	Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen

Blechkeneinfluss für $t \geq 25$ mm muss berücksichtigt werden mit Erhöhungsfaktor $k_s = (25/t)^{0,2}$, dabei ist t die Dicke des dünneren Blechs.

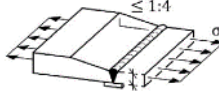



10.4.7 Stumpfstoße mit Schweißbadsicherung und Geometrieänderung

Transverse splices with backing and tapered in width or in thickness

Für die Details sind keine experimentellen Untersuchungen bekannt. Der in Tabelle 10-22 dargestellte Kerbfallvorschlag wird daher aus DIN EN 1993-1-9 [1] übernommen.

Tabelle 10-22: Kerbfallvorschlag Stumpfstoß mit Schweißbadsicherung und Geometrieänderung

Table 10-22: Proposal of fatigue detail: Transverse splices with backing and tapered in width or in thickness

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
71			Stumpfstoße mit Schweißbadsicherung und Geometrieübergang 1:4	Die Heftnaht muss innerhalb der späteren Stumpfnahnt liegen. Der Abstand e_p muss so gewählt werden, dass kein Aufschmelzen der Blechkanten eintreten kann.
50			Wie oben, aber ohne Anforderung an die Heftnähte	/

Blechkeneinfluss für $t \geq 25$ mm muss berücksichtigt werden mit Erhöhungsfaktor $k_s = (25/t)^{0,2}$, dabei ist t die Dicke des dünneren Blechs.

10.4.8 Stumpfstoße mit Dickensprung

Transverse splices with different thicknesses without transition

Für die Bewertung des Konstruktionsdetails in Kapitel 6.3.10 wurden ausschließlich Versuchsergebnisse ohne Exzentrizität der Schwerachsen berücksichtigt. Aufgrund der geringen Datengrundlage wird jedoch keine Neubewertung des Details empfohlen. Der Kerbfallvorschlag in Tabelle 10-23 orientiert sich am Kerbfallvorschlag in DIN EN 1993-1-9 [1].

Tabelle 10-23: Kerbfallvorschlag Stumpfstoß mit Dickensprung

Table 10-23: Proposal of fatigue detail: Transverse splices with different thicknesses and without transition

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
71			Stumpfstoße mit Blechen unterschiedlicher Dicke und ohne Exzentrizität	Die Nennspannung wird im dünneren Blech ermittelt
Blechkeneinfluss für $t \geq 25$ mm muss berücksichtigt werden mit Erhöhungsfaktor $k_s = (25/t)^{0,2}$, dabei ist t die Dicke des dünneren Blechs.				

10.4.9 Lamellenstoß

Lamellae joint

Die Bewertung des Konstruktionsdetails folgt der Empfehlung eines Hintergrunddokuments [73] zu DIN EN 1993-1-9 [1]. Die experimentellen Untersuchungen wurden größtenteils an Versuchskörpern ohne Geometrieänderung im Dickblechbereich durchgeführt. Für die Herleitung des Kerbfalls wurde der Blechkeneinfluss implizit berücksichtigt.

Tabelle 10-24: Kerbfallvorschlag Lamellenstoß

Table 10-24: Proposal of fatigue detail: Lamellae joint

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
90			Mehrteiliger, quer zur Kraft- richtung laufen- der Stumpfstoß	Beim Schweißen des Stumpfstoßes darf die Stirrfugennaht nicht auf- geschmolzen werden. Schweißnahtansteigs- winkel $\geq 150^\circ$
			Mehrteiliger, quer zur Kraft- richtung laufen- der Stumpfstoß mit Dickenüber- gang 1:4	Wie oben mit kerbfrei bearbeiteten Nahtüber- gängen. Die Nennspannung wird im dünneren Blech er- mittelt
Blechkeneinfluss für $t \geq 25$ mm muss berücksichtigt werden mit Erhöhungsfaktor $k_s = (25/t)^{0,2}$, dabei ist t die Dicke des dünneren Blechs.				

10.5 Tabelle 8.4 – Angeschweißte Anschlüsse und Steifen

Table 8.4 – Weld attachments and stiffeners

10.5.1 Übersicht

Overview

Die Erstellung der Tabelle erfolgte in Zusammenarbeit mit Hr. Dr. Mathias Euler (Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart) der im Project Team SC3-T8 für die Überarbeitung der Kerbfalltabellen in DIN EN 1993-1-9 [1] verantwortlich ist.

10.5.2 Längssteife

Longitudinal attachment

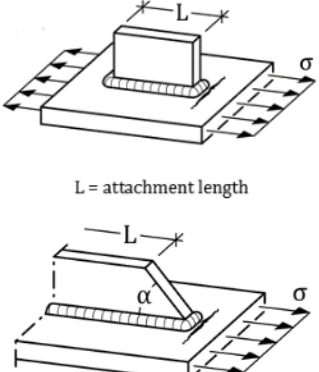

Für das Konstruktionsdetail sind eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen dokumentiert, vgl. Kapitel 6.4.2. Es wurde festgestellt, dass die experimentellen Untersuchungen zum Konstruktionsdetail Längssteife keinen signifikanten Einfluss in Abhängigkeit der Länge der Längssteife aufzeigen (vgl. 9.2.5.1). Für die Kerbfallempfehlung in Ta-

belle 10-25 wird daher eine Vernachlässigung des Parameters vorgeschlagen. Ein Vergleich mit dem Konstruktionsdetail der angefasten Längssteife (vgl. Kapitel 6.4.3) zeigt zudem, dass die Variante mit Anfasung der Lamelle keinen Vorteil für die Ermüdungsfestigkeit bietet, wenn das Detail im Schweißzustand belassen wird.

Für die Kerbfallempfehlung in Tabelle 10-25 wird für das im Schweißzustand belassene Detail eine Vereinfachung vorgeschlagen. Demnach erfolgt die Bewertung unabhängig von dem Anfasungswinkel und der Steifenlänge.

Tabelle 10-25: Kerbfallvorschlag Längssteife

Table 10-25: Proposal of fatigue detail: Longitudinal attachment

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
71	 <p>L = attachment length</p>		<p>Längssteife auf Trägern oder Blechen. Längssteife auf gekrümmten Blechen. Längssteife mit Anfasung.</p>	<p>Umlaufende Schweißnaht. Die Nennspannung wird im Grundblech unter Vernachlässigung der Steife berechnet.</p>

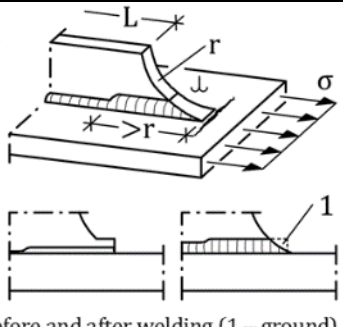
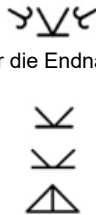
10.5.3 Längssteife mit Radius und kerbfrei bearbeitetem Kerbübergang

Longitudinal attachment with radius and smooth transition

Das Konstruktionsdetail ist eine Verbesserung gegenüber der im Schweißzustand belassenen Längssteife. Der Endradius und die voll durgeschweißte Endnaht ermöglichen eine kerbfreie Bearbeitung der ermüdungskritischen Stelle. Für das Detail sind keine für eine Kerbfalleitung geeigneten Versuche bekannt, vgl. Kapitel 6.4.4. Eine Verbesserung gegenüber der im Schweißzustand belassenen Variante in Tabelle 10-25 ist plausibel. Die Kerbfallempfehlung in Tabelle 10-26 folgt der aktuellen Kerbfalleinstufung in DIN EN 1993-1-9 [1].

Tabelle 10-26: Kerbfallvorschlag Längssteife mit Endverstärkung

Table 10-26: Proposal of fatigue detail: Longitudinal attachment

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80	 <p>Before and after welding (1 – ground)</p>	 <p>(für die Endnaht)</p> <p>(für die Flanken-nahte)</p>	<p>Längssteife mit Ausrundung und verstärkter Endnaht</p>	<p>$r > 150 \text{ mm}$ Endnaht voll durchgeschweißt und kerbfrei bearbeitet</p>

10.5.4 Längssteife am Bauteilrand

Gusset plate

Für das Konstruktionsdetail sind eine Vielzahl experimenteller Untersuchungen bekannt, vgl. Kapitel 6.4.5. Die Daten beinhalten auch Versuche mit Steifen, die dünner sind als die Dicke des Grundblechs. Die statistische Auswertung der experimentellen Untersuchungen unterstützt die in Tabelle 10-27 vorgeschlagene Anhebung der Ermüdungsfestigkeit auf Kerbfall 56.

Tabelle 10-27: Kerbfallvorschlag Längssteife am Bauteilrand

Table 10-27: Proposal of fatigue detail: Gusset plate

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
56			Längssteife am Bauteilrand Angefaste Längssteife am Bauteilrand	Umlaufende Schweißnaht. Die Nennspannung wird im Grundblech unter Vernachlässigung der Steife berechnet. Die Blechdicke der Steife darf dünner sein als die Grundblechdicke

10.5.5 Längssteife am Bauteilrand mit Radius und kerbfrei bearbeitetem Schweißnahtübergang

Gusset plate with radius and smooth transition

Das Konstruktionsdetail wird in DIN EN 1993-1-9 [1] in Abhängigkeit des Ausrundungsradius zwischen Kerbfall 50 und Kerbfall 90 eingestuft. Die Einstufungen basieren nicht auf Versuchen, sondern auf bruchmechanischen Modellen, vgl. Kapitel 6.4.6.1. Experimentelle Untersuchungen lassen keine Rückschlüsse auf den Einfluss des Radius zu. Für den Kerbfallvorschlag in Tabelle 10-28 wird eine einheitliche Kerbfallbewertung vorgeschlagen.

Tabelle 10-28: Kerbfallvorschlag Längssteife am Bauteilrand

Table 10-28: Proposal of fatigue detail: Gusset plate

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
71		<p>(für die Endnaht)</p> <p>(für die Flanken-nahte)</p>	Längssteife am Bauteilrand mit Radius und kerbfrei bearbeitet	$r > 150 \text{ mm}$ Endnaht voll durchgeschweißt und kerbfrei bearbeitet Die Blechdicke der Steife darf dünner sein als die Grundblechdicke

10.5.6 Quersteife

Transverse attachment

Für das Konstruktionsdetail sind viele experimentelle Untersuchungen bekannt, vgl. Kapitel 6.4.7 und Kapitel 6.4.7. Für fast alle experimentellen Untersuchungen gilt, dass der Abstand der Schweißnahtübergänge $\ell < 50\text{mm}$ ist. Die Herabstufung $\ell > 50\text{ mm}$ wird aus DIN EN 1993-1-9 [1] übernommen. Experimentelle Untersuchungen in [34] zeigen einen deutlichen Zusammenhang.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Ermüdungsfestigkeit von Quersteifen in gewalzten und geschweißten Trägern vergleichbar mit der Ermüdungsfestigkeit von Quersteifen auf Blechen ist. Versuche an Quersteifen in Kastenträgern sind nicht bekannt, werden aber entsprechend dem Kerbfall DIN EN 1993-1-9 [1] ebenfalls mit aufgenommen.

Für die Ermüdungsfestigkeit der Quersteifen in Biegeträgern ist es unerheblich, ob diese mit oder ohne Aussparung im Eckbereich ausgeführt werden, vgl. Kapitel 6.4.8.

Experimentelle Untersuchungen an halbhohen Quersteifen zeigen, dass auch hier Kerbfall 80 geeignet ist, wenn die maximale Hauptspannung anstelle der Nennspannung berücksichtigt wird.

Der Kerbfallvorschlag für Quersteifen auf Blechen und in Trägern ist in Tabelle 10-29 dargestellt.

Tabelle 10-29: Kerbfallvorschlag: Quersteife

Table 10-29: Proposal of fatigue detail: Transverse attachment

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80 ($\ell \leq 50$ mm) 71 ($50 < \ell \leq$ 80 mm)			Quersteife auf Blechen	Die Nennspannung wird im Grundblech bzw. im Träger unter Vernachlässigung der Steife berechnet.
			eingepasste Quersteifen in gewalzten Trägern	
			eingepasste Quersteifen in geschweißten Trägern, überschweißen der Längsnaht	
			Quersteife mit Aussparung, Umschweißung an Flansch und Steg	
			Quersteife mit Aussparung ohne Umschweißung	
			Halbhohe Quersteifen	

10.5.7 Kopfbolzen und Schweißbuchsen

Shear studs and welded bushings

Für die statistische Bewertung des Details wurden in Kapitel 6.4.9 ausschließlich Versuche betrachtet, bei denen nur das Grundblech einer Ermüdungsbelastung ausgesetzt wurde. Für den Kerbfallvorschlag in Tabelle 10-30 wurde das bestehende Konstruktionsdetail in DIN EN 1993-1-9 [1] um Schweißbutzen erweitert. Das Detail gilt sowohl für hubgeschweißte als auch für umschweißte Konstruktionsdetails. Die Begrenzung für Details mit $l \leq 50$ mm orientiert sich an der Begrenzung für das Detail Quersteife, vgl. Tabelle 10-29.

Tabelle 10-30: Kerbfallvorschlag: Kopfbolzen und Schweißbutzen

Table 10-30: Proposal of fatigue detail: Shear studs and welded bushings

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80			Umschweißte oder hubgeschweißte Butzen oder Dübel	$l \leq 50$ mm

10.6 Tabelle 8.5 – Geschweißte Stöße

Table 8.5 – Load carrying welded joints

Nachfolgend sind die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen der Kerbdetails aus Tabelle 8.5 in Form neuer Kerbfallempfehlungen dargestellt. Es werden nur diejenigen Kerbdetails gezeigt, für welche Ergebnisse auf Grundlage einer aussagekräftigen Datenbasis abgeleitet werden konnten.

10.6.1 Kreuz und T-Stöße (Schweißnaht-Übergangsversagen) – Detail 1

Cruciform and Tee joints (weld toe failure) – Detail 1

Wie in Abschnitt 6.5.1 gezeigt deckt die vorliegende Datenbasis nur einen sehr begrenzten Parameterbereich der Einflussgrößen Blechdicke des Grundbleches t und Abstand der Schweißnahtübergänge l ab. Kerbfallempfehlungen können daher nur für Schweißnahtübergangsabstände von $l \leq 50$ mm und 50 mm $< l \leq 80$ mm abgeleitet werden. Wie bereits thematisiert kann für $l \leq 50$ mm der aktuelle Kerbfall nach DIN EN 1993-1-9 [1] nicht bestätigt werden. Der gegenwärtige Datenbestand für diesen Parameterbereich deckt sich besser mit der Kerbfalleinstufung von 71 nach IIW-Empfehlung [16]. Für den Bereich 50 mm $< l \leq 80$ mm liegt die aktuelle statistische Auswertung nur geringfügig unter dem Kerbfall 71. Eine Einstufung nach dem bisherigen Kerbfall 71 ist noch vertretbar.

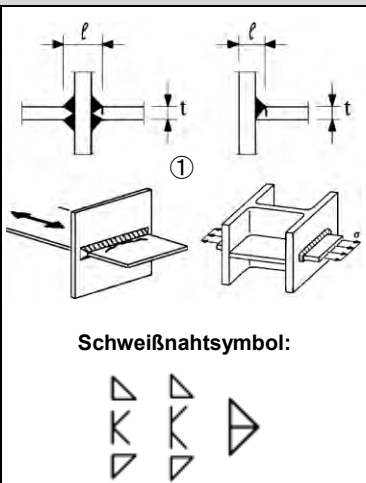
Weiter ist zu beachten, dass die Nennspannungsschwingbreite auf Grundlage des Grundblechquerschnitts nur dann ohne Anpassungen verwendet werden kann, wenn die Spannungsverteilung am Schweißnahtübergang über die gesamte Schweißnahtlänge weitgehend konstant ist. Sind am Randbereich oder in Bauteilmitte Spannungsspitzen, bspw.

aufgrund unterschiedlicher Steifigkeitsverteilungen am Zwischenbauteil, zu erwarten, dann müssen für die Nachweisführung modifizierte Nennspannungen verwendet werden.

Tabelle 10-31: Kerbfallempfehlung für Detail 1

Table 10-31: Detail recommendation for detail 1

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen
71	$l \leq 80$	alle t	Kreuz- und T-Stöße: ①: Riss am Schweißnahtübergang an voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten.	- Gleichmäßige Lasteinleitung in das Zwischenbauteil und gleichmäßige Spannungsverteilung am Schweißnahtübergang. Ansonsten ist $\Delta\sigma$ als modifizierte Nennspannungsschwingbreite zu ermitteln. (Siehe Detail ②) - Bei nicht durchgeschweißten Nähten ist zusätzlich ein Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel (Detail ③) erforderlich. - Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.
63	$80 < l \leq 100$	alle t		
56	$100 < l \leq 120$	alle t		
56	$l > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < l \leq 200$	$t > 20$		
	$l > 200$	$20 < t \leq 30$		
45	$200 < l \leq 300$	$t > 30$		
	$l > 300$	$30 < t \leq 50$		
40	$l > 300$	$t > 50$		



10.6.2 Kreuz und T-Stöße (Schweißnaht-Wurzelversagen) – Detail 3

Cruciform and Tee joints (root failure) – Detail 3

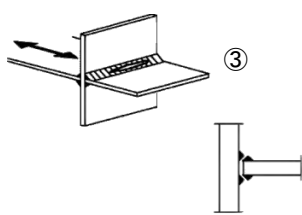

Die Kerbfalleitung des Kerbdetails 3 (Abschnitt 6.5.1) liefert einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 38 \text{ N/mm}^2$ und liegt damit zwischen Kerbfall 36 und Kerbfall 40. Die umfangreiche Datenbasis deckt eine Vielzahl an unterschiedlichen Einflussgrößen ab. Bei der Kerbfallempfehlung muss berücksichtigt werden, dass eine Ermüdungsrissentstehung bei rein visueller Inspektion unbemerkt bleibt und erst bei einem Risswachstum bis hin zur Bauteiloberfläche festgestellt werden kann. Mitunter können zu diesem Zeitpunkt aber schon erhebliche Rissgrößen vorliegen, so dass in Abhängigkeit des Anwendungsfalls diese Versagensform, ausgehend von der innenliegenden Schweißnahtwurzel, vollständig ausgeschlossen werden muss.

Zudem kann an dieser Stelle die Ursache des festgestellten Mittelspannungseinflusses (siehe Abschnitt 9.3), der ausschließlich an Kleinbauteilen durchgeführten Ermüdungsversuche, nicht final geklärt werden. Es fehlen für dieses Kerbdetail Großbauteilversuche an Probekörpern mit repräsentativen, realitätsnahen Eigenspannungszuständen.

Vor diesem Hintergrund erscheint gegenwärtig eine Kerbfalleinstufung mit Kerbfall 36 gerechtfertigt.

Tabelle 10-32: Kerbfallempfehlung für Detail 3

Table 10-32: Detail recommendation for detail 3

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
36			③: Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten T-Stößen, Kehlnähten oder in T-Stößen nach Bild 4.6 in EN 1993-1-8:2005	- Es sind 2 Ermüdungsnachweise erforderlich: zum einen der Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen nach Abschnitt 5 (DIN EN 1993-1-9:2010) mit Kerbgruppe 36 für σ_w und Kerbgruppe 80 ($m = 5$) für τ_w , zum anderen der Nachweis des Nahtüberganges mit Bestimmung von $\Delta\sigma$ in den belasteten Blechen (Detail ①). - Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.

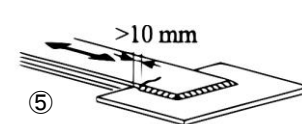

10.6.3 Laschenverbindung (Deckblechversagen) – Detail 5

Overlapped joint (cover plate failure) – Detail 5

Wie in Abschnitt 6.5.2 beschrieben, umfassen die gegenwärtig zu Kerbdetail 5 vorhandenen Ermüdungsversuche nur Probekörper mit ausschließlich Längsnähten. Ein möglicherweise positiver Einfluss der querverlaufenden Stirnnaht entsprechend der Ausführungsvariante nach DIN EN 1993-1-9 [1] ist daher in den Versuchsergebnissen nicht berücksichtigt. Konservativ kann daher auf Grundlage der Auswertung in Abschnitt 6.5.2 nur der Kerbfall 45 abgeleitet werden.

Tabelle 10-33: Kerbfallempfehlung für Detail 5

Table 10-33: Detail recommendation for detail 5

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
45			⑤: Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung. Hinweis: Der Kerbfall deckt auch Laschenverbindungen ausschließlich mit Längsnähten (ohne Stirnnaht) ab.	- Berechnung von $\Delta\sigma$ in den überlappenden Laschen. - Die Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein. - Ein Schubabriss in der Schweißnaht ist mit Kerbfall ⑧ zu überprüfen.

10.6.4 Gurtlamelle auf Träger („Normalausführung“ am Lamellenende) – Detail 6

Cover plate on beams (“standard design” at cover plate’s end) – Detail 6

Wie in Abschnitt 6.5.3 beschrieben liegen für die Gurtlamelle mit „Normalausführung“ der Gurtlamellenenden nur Großbauteilversuche im Bereich $t_c \geq t$ sowie $t_c \leq 20$ mm vor. Für diesen Geometrieparameterbereich kann der Kerbfall 50 nach DIN EN 1993-1-9 [1] bestätigt werden. Die anderen Parameterbereiche sollten zukünftig durch weitere experimentelle Untersuchungen abgesichert werden.

Tabelle 10-34: Kerbfallempfehlung für Detail 6

Table 10-34: Detail recommendation for detail 6

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Beschreibung	Anforderungen
	$t_c < t$	$t_c \geq t$		
56*	$t \leq 20$	-	<p>Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern:</p> <p>⑥: Endbereiche von einlagig oder mehrlagig aufgeschweißten Gurtplatten mit und ohne Stirrnaht.</p>	<p>- Die minimale Lamellenlänge beträgt 300 mm. Für kürzere Lamellen siehe Abstufung für Detail ①.</p> <p>- Wenn die Lamellen breiter sind als der Flansch, ist eine Stirrnaht, die sorgfältig ausgeschliffen wird, um Einbrandkerben zu entfernen, erforderlich.</p>
50	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$		
45	$30 < t \leq 50$	$20 < l \leq 30$		
40	$t > 50$	$30 < l \leq 50$		
36	-	$t > 50$		

10.6.5 Schubbeanspruchte Kehlnähte – Detail 8

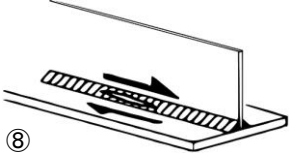

Shear stressed fillet welds – Detail 8

Die Auswertung der gefilterten Versuchsdaten der schubbeanspruchten Kehlnähte (Abschnitt 6.5.4) liefert einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\tau_c = 100 \text{ N/mm}^2$ und liegt damit zwei Kerbfallklassen über den aktuellen Empfehlungen nach DIN EN 1993-1-9 [1]. Aufgrund der aktuellen Datenlage kann daher eine moderate Erhöhung der Kerbfalleinstufung auf Kerbfall 90 ($m = 5$) vertreten werden. Zukünftig sollten jedoch noch offene Fragestellungen geklärt werden. Hierzu zählt der Einfluss unterschiedlicher Probekörpertypen auf die Ergebnisse der Ermüdungsversuche. Gegenwärtig beinhaltet die Datenbasis nur wenige Großbauteilversuche an realitätsnahen, geschweißten I-Trägern und viele Versuche am Ersatzprobekörpertyp, einem auf Torsion beanspruchten Kreishohlprofil mit beidseitig angeschweißter Stirnplatte. Letzter Typ wurden bisher nur bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1,0$ geprüft. Aufgrund fehlender Vergleichbarkeit kann der Mittelspannungseinfluss nicht final bewertet werden.

Zudem muss eine Änderung der Kerbfalleinstufung des Kerbdetails 8 auch unter Berücksichtigung des Einflusses auf den Interaktionsnachweis für mehraxiale Beanspruchungszustände bewertet werden. Eine weitreichende Abschätzung von kombinierten Beanspruchungen ist jedoch anhand der gegenwärtig vorhandenen Datenbasis nicht möglich. Für die Anwendung des Interaktionsnachweises nach DIN EN 1993-1-9 – Abschnitt 8 [1], wird daher weiterhin der konservativ gewählte Kerbfall 80 ($m = 5$) empfohlen.

Tabelle 10-35: Kerbfallempfehlung für Detail 8

Table 10-35: Detail recommendation for detail 8

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
90 ($m = 5$)			⑧: Durchgehende Kehlnähte, die einen Schubfluss übertragen, wie z. B. Halskehlnähte zwischen Stegblech und Flansch bei geschweißten Blechträgern.	- $\Delta\tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen zu berechnen. - Der Interaktionsnachweis nach Abschnitt 8 (DIN EN 1993-1-9:2010) ist mit $\Delta\tau = 80$ ($m = 5$) zu führen.



10.6.6 Kopfbolzendübel in Verbundwirkung unter Schubbeanspruchung – Detail 10

Welded stud in composite application under shear stress – Detail 10

Auf Grundlage der in Abschnitt 6.5.5 dargestellten statistischen Auswertung kann für eine feste Neigung von $m = 8$ der Kerbfall 90 bestätigt werden. Die vorhandene Datenbasis beinhaltet ausschließlich Kopfbolzendübelverbindungen, welche mit dem Hubzündungsbolzenschweißen gefügt wurden.

Tabelle 10-36: Kerbfallempfehlung für Detail 10

Table 10-36: Detail recommendation for detail 10

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
siehe EN 1992-4 90 ($m = 8$)			<u>Schweißnähte unter Querkraftbeanspruchung:</u> Ⓣ: Kopfbolzendübel in Verbundwirkung	- $\Delta\tau$ wird am Nennquerschnitt des Dübels ermittelt.

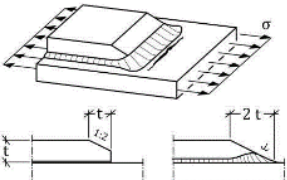

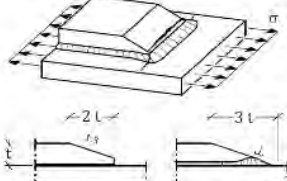

10.6.7 Verstärkte Gurtlamellenenden

Reinforced transverse end weld of cover plates

Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen in Kapitel 7 wird Kerbfall 80 für das Konstruktionsdetail vorgeschlagen, vgl. Tabelle 7-8.

Tabelle 10-37: Kerbfallvorschlag Gurtlamellenende

Table 10-37: Proposal of fatigue detail: Transverse end weld of cover plates

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Schweißsymbol	Beschreibung	Anforderung
80			Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Trägern, Steigung der Stirnnaht und Lamelle 1:2	Stirnnaht ist blecheben zu bearbeiten, Nahtübergang kerbfrei bearbeitet, Heftnähte an Stirnseite vermeiden
80			Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Trägern, Steigung der Stirnnaht und Lamelle 1:3	Stirnnaht ist blecheben zu bearbeiten, Nahtübergang kerbfrei bearbeitet, Heftnähte an Stirnseite vermeiden

10.6.8 Stirnplattenverbindungen mit vorgespannten Schrauben

Endplate connections with prestressed bolts

Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen in Kapitel 8 wird folgende Kerbfallempfehlung gegeben, siehe auch Tabelle 8-7.

Tabelle 10-38: Kerbfallvorschlag Stirnplattenverbindung mit vorgespannten Schrauben in Tabelle 8.5

Table 10-38: Detail suggestion for endplate connection with prestressed bolts in table 8.5

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80	<p>$l \leq 50mm$ $h \leq 300mm$</p>		<p><u>Stirnplattenverbindungen mit überstehender Stirnplatte, doppelsymmetrischem I-Profil und 3 Schraubenreihen:</u></p> <p>⑬: Riss am Schweißnahtübergang in voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten am Zugflansch (Unterflansch)</p>	<p>⑬: $\Delta\sigma$ ist mit korrigierten Nennspannungen^{a)} zu ermitteln.</p> <p>⑭: Es ist zusätzlich Detail 8 Tabelle 8.5 nachzuweisen.</p> <p><u>Kerbfälle ⑬ und ⑭:</u> Voll durchgeschweißte Stumpfnah am Steg und Druckflansch (Oberflansch). Es dürfen nur vorgespannte Schrauben nach EN 1993-1-8 und EN 1090-2 verwendet werden. Der Nachweis der Schraube erfolgt nach Detail 14 Tabelle 8.1. Die Positionierung der unteren zwei Schraubenreihen erfolgt möglichst nah am Zugflansch (Unterflansch).</p>
40	<p>$h \leq 300mm$</p>		<p>⑭: Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten Nähten oder Kehlnähten am Zugflansch (Unterflansch)</p>	

^{a)} Konservative Abschätzung: $k_r = 2,0$

10.7 Tabelle 8.6 – Hohlprofile

Table 8.6 – Hollow sections

Nachfolgend sind die Ergebnisse der in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Untersuchungen der Kerbdetails aus Tabelle 8.6 in Form neuer Kerbfallempfehlungen dargestellt. Es werden nur diejenigen Kerbdetails gezeigt, für welche die Ergebnisse auf Grundlage einer aussagekräftigen Datenbasis abgeleitet werden konnten. Sofern bei den durchgeführten Untersuchungen eine Eingrenzung oder Erweiterung der bisher nach DIN EN 1993-1-9 [1] geltenden Hohlprofilabmessungen notwendig oder möglich ist, so ist dies nachfolgend explizit angegeben. Ansonsten bleibt die bisher nach DIN EN 1993-1-9 [1] geltende Einschränkung auf Hohlprofilwanddicken von $t \leq 12,5 \text{ mm}$ bestehen.

10.7.1 Rohr-Blech-Anschluss mit zusammengedrücktem Endquerschnitt – Detail 1

Tube-plate joint, tubes flatted and butt welded – Detail 1

Alle vorliegenden Ermüdungsversuche des Rohr-Blech-Anchlusses mit zusammengedrücktem Endquerschnitt wurden mit einem Rohrdurchmesser $d = 88,9 \text{ mm}$ und einer Wanddicke von $t = 5 \text{ mm}$ durchgeführt. Hierfür kann der gegenwärtig nach DIN EN 1993-1-9 [1] geltende Kerbfall 71 bestätigt werden. Der Parameterbereich nach DIN EN 1993-1-9 [1] für Hohlprofilabmessungen mit einem Durchmesser $d < 200 \text{ mm}$ und, vor allem, Wanddicken $t \leq 12,5 \text{ mm}$ unabhängig vom gewählten Rohrwerkstoff erscheint zu groß gewählt zu sein. Ein zusätzlicher Nachweis der ausreichenden Zähigkeit des Grundwerkstoffes sowie des Einflusses der Umformung des Rohrendquerschnitts sind Voraussetzungen für die Verwendung dieses Kerbdetails.

Tabelle 10-39: Kerbfallempfehlung für Detail 1

Table 10-39: Detail recommendation for detail 1

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
71		X	①: Ringflanschanchluss mit zusammengedrücktem Endquerschnitt, Stumpfnahtheit (X-Naht).	<ul style="list-style-type: none"> - $\Delta\sigma$ ist am Rohrquerschnitt zu berechnen. - Bei der Umformung des Endquerschnitts der Rohrhalbeuge ist eine ausreichende Zähigkeit des Grundmaterials sicherzustellen. Eine Vorschädigung (Rissbildung) muss ausgeschlossen werden.

10.7.2 Stumpfstöße zwischen Kreishohlprofilen – Detail 3

Butt welded end-to-end joints between circular structural hollow sections – Detail 3

Die statistische Auswertung der stumpfgestoßenen Kreishohlprofile (Abschnitt 6.6.2) liefert einen charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 78 \text{ N/mm}^2$. Die Datenbasis deckt dabei Wanddicken zwischen 11 mm und 43,6 mm ab und bestätigt nicht den nach DIN EN 1993-1-9 [1] für diese Wanddicken gelten Kerbfall 90. Vielmehr decken sich die Ergebnisse mit dem nach DIN EN 1993-1-9 [1] für Wanddicken $t \leq 8 \text{ mm}$ geltenden Kerbfall 71. Dieser entspricht auch Kerbdetail 13 nach Tabelle 8.3 der einseitig geschweißten Stumpfnahtheit. Daher wird empfohlen, die Anhebung um zwei Kerbfallklassen für Wanddicken $t > 8 \text{ mm}$ zu streichen. Eine Ausweitung auf Blechdicken $t > 12,5 \text{ mm}$ ist für dieses Kerbdetail experimentell abgesichert.

Tabelle 10-40: Kerbfallempfehlung für Detail 3

Table 10-40: Detail recommendation for detail 3

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
71		✓	<u>Quernähte:</u> ③: Stöße von Rundhohlprofilen mit durchgeschweißten Stumpfnähten.	<ul style="list-style-type: none"> - Nahtüberhöhung $\leq 10\%$ der Schweißnahtdicke mit verlaufendem Übergang in das Grundmaterial. - Wanddicken größer $t > 12,5 \text{ mm}$ sind mit abgedeckt. - Konstruktionsdetails mit $t > 8 \text{ mm}$ dürfen 2 Kerbfallkategorien höher eingestuft werden.

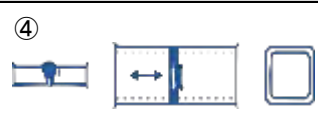

10.7.3 Stumpfstöße zwischen Kreishohlprofilen – Detail 4

Butt welded end-to-end joints between rectangular structural hollow sections – Detail 4

Im Gegensatz zu den stumpfgestoßenen Kreishohlprofilen (Kerbdetail 3) sind für die stumpfgestoßenen Rechteckhohlprofile (Kerbdetail 4) nur Versuche für den Wanddickenbereich von $t \leq 8 \text{ mm}$ vorhanden. Die statistische Auswertung aus Abschnitt 6.6.2 deckt sich mit der gegenwärtig gewählten Einstufung in Kerbfall 56. Eine Hochstufung um zwei Kerbfallklassen für $t > 8 \text{ mm}$ kann auch für Rechteckhohlprofile auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis nicht begründet werden.

Tabelle 10-41: Kerbfallempfehlung für Detail 4

Table 10-41: Detail recommendation for detail 4

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
56			<p><u>Quernähte:</u> (4): Stöße von Rechteckhohlprofilen mit durchgeschweißten Stumpfnähten.</p>	<p>- Nahtüberhöhung $\leq 10\%$ der Schweißnahtdicke mit verlaufendem Übergang in das Grundmaterial. - Konstruktionsdetails mit $t > 8 \text{ mm}$ dürfen 2 Kerbfalkategorien höher eingestuft werden.</p>

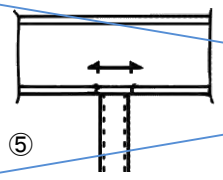

10.7.4 Hohlprofil als Anbauteil – Detail 5

Hollow sections as welded attachments – Detail 5

Für Kerbdetail 5, dem mit Kehlnähten an ein anderes Bauteil geschweißten Hohlprofil, liegen nach Abschnitt 6.6.3 nur sehr wenige experimentelle Daten vor, welche zudem nur aus der Sekundärliteratur entnommen werden konnten. Die statistische Auswertung dieser Daten deckt sich aber mit der Einstufung nach DIN EN 1993-1-9 [1] mit Kerbfall 71. Größtenteils decken sich die Ergebnisse auch mit jenen der Quersteife (Kerbdetail 6) aus Tabelle 8.4. Aufgrund großer Parallelen der beiden Kerbdetails und aus Gründen der Vereinfachung wird daher empfohlen Kerbdetail 5 in den Kerbfall 6 (Quersteife) nach Tabelle 8.4 zu überführen.

Tabelle 10-42: Kerbfallempfehlung für Detail 5

Table 10-42: Detail recommendation for detail 5

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
71			<p><u>Nicht tragende Schweißnähte:</u> (5): Mit Kehlnähten an ein anderes Bauteil angeschweißte runde oder rechteckige Hohlprofile.</p>	<p>- Nicht tragende Schweißnähte. - Querschnittsbreite parallel zur Spannungsrichtung $l \leq 100 \text{ mm}$. - Für andere Fälle siehe Tabelle 8.4.</p>

Siehe Kerbdetail Quersteife (Detail 6 / Tabelle 8.4)

10.7.5 Kopfplattenstöße an Hohlprofilen mit Kehlnähten – Detail 9

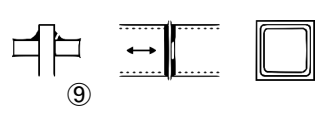

Structural hollow sections, fillet-welded end-to-end joints with an intermediate plate – Detail 9

Gegenwertig liegen nur für kehlnahtgeschweißte Kopfplattenstöße von Rechteckhohlprofilen experimentelle Versuchsdaten vor. Eine Kerbfallempfehlung kann daher nur für Kerbdetail 9 erfolgen. Die statistische Auswertung der gefilterten Versuchsdaten (Abschnitt 6.6.4) liegt mit einem charakteristischen Wert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 33 \text{ N/mm}^2$ sogar geringfügig unter dem niedrigsten Kerbfall 36 nach DIN EN 1993-1-9 [1]. Nur bei hoher Schweißnahtgüte, insbesondere in den Eckbereichen der Rechteckhohlprofile, kann die Einstufung mit Kerbfall 36 weiterhin empfohlen werden.

Die Einschränkung nach DIN EN 1993-1-9 [1] auf Wanddicken von $t \leq 8 \text{ mm}$ deckt sich mit der vorhandenen Datenbasis und wird in der Kerbfallempfehlung in Tabelle 10-43 übernommen. Zudem werden fehlende Information zur Spannungsermittlung ergänzt.

Tabelle 10-43: Kerbfallempfehlung für Detail 9

Table 10-43: Detail recommendation for detail 9

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
36			Tragende Schweißnähte: ⑨: Kopfplattenstoß von Rechteckhohlprofilen mit Kehlnähten.	- Tragende Schweißnähte. - Wanddicken $t \leq 8$ mm. - Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen σ_w bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt (Abschnitt 5 - DIN EN 1993-1-9:2010).

10.8 Tabelle 8.7

Table 8.7

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen können alle vier Details der Tabelle 8.7 beurteilt werden. Da die Rohrknotten aufgrund der komplexen Geometrie mittels Nennspannung nur recht ungenau beurteilt werden können, wird empfohlen, diese Details mittels lokaler Konzepte nachzuweisen. Die Geometrieanforderungen werden im Folgenden für jedes Detail einzeln neu evaluiert. Für eine Übernahme der Kerbfälle in die Normung wären allerdings möglichst einheitliche Anforderungen erstrebenswert.

Ferner werden aktuell gezielte Projekte [150, 151] zur Kerbfallbewertung von Rohrknotten durchgeführt, auf die hier zusätzlich verwiesen werden soll.

10.8.1 K- und N-Rundhohlprofil-Knoten mit Spalt – Detail 1

K and N circular structural hollow section joints with gap – Detail 1

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.7.2 wurden je nach Wandstärkenverhältnis Kerbfälle von 80 und 40 für K- und N-Knoten mit Rundhohlprofilen und Spalt abgeleitet, die jeweils eine Klasse unterhalb der derzeit gültigen Kategorien liegen. Allerdings wurden bei diesen Versuchsserien einige der bisher gültigen Anforderungen nicht erfüllt, sodass die Anforderungen angepasst werden sollten. Dies betrifft zunächst die Wandstärke des Gurtes. Wie in Abschnitt 9.2.3 gezeigt wurde, wirkt sich eine große Gurtwandstärke positiv auf die Ermüdungsfestigkeit aus. Zudem wurde die bisherige Anforderung $t_0 \leq 8$ mm bei einigen Versuchsserien nicht eingehalten. Aus diesem Grund wird diese Geometriebedingung fortan nicht mehr gefordert. Außerdem werden Winkel bis 60° zugelassen, da auch dies besser zu der Versuchsbasis passt. Die damalige Bedingung $\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ wurde, wie in Abschnitt 6.7.1 erläutert bei einem Großteil der Probekörper ebenfalls nicht eingehalten. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, zur lockeren Bedingung $\frac{d_0}{t_0} \leq 25$ zurückzugreifen. In Abschnitt 9.2.3 konnte außerdem gezeigt werden, dass eine lineare Interpolation zwischen den Kerbgruppen 80 und 40 in Abhängigkeit des Wandstärkenverhältnisses sinnvoll ist. Tabelle 10-44 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-44: Kerbfallempfehlung Detail 1

Table 10-44: Detail recommendation detail 1

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
80 m=5		\triangle $\triangle\triangle$	①: K- und N-Knoten mit Rundhohlprofilen und Spalt	<ul style="list-style-type: none"> • Es sind getrennte Nachweise für Gurt und Diagonalen zu führen. • Bei Zwischenwerten von t_0/t_i ist zwischen den Kerbfalklassen linear zu interpolieren. • $t_i \leq 8 \text{ mm}$ • $35^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ • $\frac{d_0}{t_0} \leq 25$ • $0,25 \leq \frac{d_i}{d_0} \leq 1$ • $d_0 \leq 300 \text{ mm}$ • $-0,5 d_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 d_0$ • $e_{o/p} \leq 0,02 d_0$ [$e_{o/p}$: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene]
40 m=5				

10.8.2 K- und N-Rechteckprofil-Knoten mit Spalt – Detail 2

K and N rectangular structural hollow section joints with gap – Detail 2

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.7.3 wurden je nach Wandstärkenverhältnis Kerbfälle von 71 und 36 für K- und N-Knoten mit Rechteckprofilen abgeleitet, was für $\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$ eine Klasse unterhalb der derzeit gültigen Kategorie liegt. Allerdings wurde bei diesen Versuchsserien eine bisher gültige Anforderung nicht erfüllt, sodass diese angepasst werden sollte. Dies betrifft die Bedingung $\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$, welche bei einem Großteil der Probekörper nicht eingehalten ist, siehe Abschnitt 6.7.1. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, zur lockeren Bedingung $\frac{b_0}{t_0} \leq 25$ zurückzugreifen. Wie in Abschnitt 9.2.3 gezeigt wurde, wirkt sich eine große Gurtwandstärke positiv auf die Ermüdungsfestigkeit aus. Aus diesem Grund wird die Geometriebedingung $t_0 \leq 8 \text{ mm}$ fortan nicht mehr gefordert. In Abschnitt 9.2.3 konnte außerdem gezeigt werden, dass eine lineare Interpolation zwischen den Kerbgruppen 80 und 40 in Abhängigkeit des Wandstärkenverhältnisses sinnvoll erscheint. Tabelle 10-45 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-45: Kerbfallempfehlung Detail 2

Table 10-45: Detail recommendation detail 2

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
63 m=5		\triangle $\triangle\triangle$	②: K- und N-Knoten mit Rechteckprofilen und Spalt	<ul style="list-style-type: none"> • Es sind getrennte Nachweise für Gurt und Diagonalen zu führen. • Bei Zwischenwerten von t_0/t_i ist zwischen den Kerbfallklassen linear zu interpolieren. • $t_i \leq 8 \text{ mm}$ • $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ • $\frac{b_0}{t_0} \leq 25$ • $0,4 \leq \frac{b_i}{b_0} \leq 1$ • $b_0 \leq 200 \text{ mm}$ • $-0,5 h_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 h_0$ • $e_p \leq 0,02 b_0$ • $0,5 (b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1 (b_0 - b_i)$ • $g \geq 2 t_0$ [$e_{o/p}$: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene]
36 m=5				

10.8.3 K-Knoten mit Überlappung – Detail 3

K joints with overlap – Detail 3

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.7.4 konnten die Kerbfälle von 71 und 56 für K-Knoten mit Überlappung je nach Wandstärkenverhältnis bestätigt werden. Allerdings wurde bei diesen Versuchsserien eine bisher gültige Anforderung nicht erfüllt, sodass diese angepasst werden sollten. Dies betrifft die damalige Bedingung $\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ bzw. $\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$, welche wie in Abschnitt 6.7.1 erläutert bei einem Großteil der Probekörper nicht eingehalten ist. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, zur lockeren Bedingung $\frac{d_0}{t_0} \leq 25$ bzw. $\frac{b_0}{t_0} \leq 25$ zurückzugreifen. Wie in Abschnitt 9.2.3 gezeigt wurde, wirkt sich eine große Gurtwandstärke positiv auf die Ermüdungsfestigkeit aus. Aus diesem Grund wird die Geometriebedingung $t_0 \leq 8 \text{ mm}$ fortan nicht mehr gefordert. In Abschnitt 9.2.3 konnte außerdem gezeigt werden, dass eine lineare Interpolation zwischen den Kerbgruppen 71 und 56 in Abhängigkeit des Wandstärkenverhältnisses sinnvoll ist. Tabelle 10-46 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-46: Kerbfallempfehlung Detail 3

Table 10-46: Detail recommendation detail 3

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
71 m=5 $\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$			<p>③: K-Knoten mit Rechteck- oder Rundhohlprofilen und Überlappung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es sind getrennte Nachweise für Gurt und Diagonalen zu führen. • Bei Zwischenwerten von t_0/t_i ist zwischen den Kerbfallklassen linear zu interpolieren. • $t_i \leq 8 \text{ mm}$ • $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ • $\frac{b_0}{t_0} \leq 25$ bzw. $\frac{d_0}{t_0} \leq 25$ • $0,4 \leq \frac{b_i}{b_0} \leq 1$ bzw. $0,25 \leq \frac{d_i}{d_0} \leq 1$ • $b_0 \leq 200 \text{ mm}$ bzw. $d_0 \leq 300 \text{ mm}$ • $-0,5 h_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 h_0$ bzw. $-0,5 d_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 d_0$ • $e_{o/p} \leq 0,02 b_0$ bzw. $e_{o/p} \leq 0,02 d_0$ [$e_{o/p}$: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene] • $0,3 \leq \frac{q}{p} \leq 1$ 	
56 m=5 $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$				

10.8.4 N-Knoten mit Überlappung – Detail 4

N joints with overlap – Detail 4

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.7.5 wurden je nach Wandstärkenverhältnis Kerbfälle von 80 und 50 für N-Knoten mit Überlappung abgeleitet, was für $\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$ eine Klasse oberhalb der derzeit gültigen Kategorie liegt. Ferner wurden bei diesen Versuchsserien bisher gültige Anforderungen nicht immer erfüllt, sodass diese angepasst werden sollten. Dies betrifft vor allem die damalige Bedingung $\frac{d_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$ bzw. $\frac{b_0}{t_0} \cdot \frac{t_0}{t_i} \leq 25$, welche wie in Abschnitt 6.7.1 erläutert bei einem Großteil der Probekörper nicht eingehalten ist. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, zur lockeren Bedingung $\frac{d_0}{t_0} \leq 25$ bzw. $\frac{b_0}{t_0} \leq 25$ zurückzugreifen. Wie in Abschnitt 9.2.3 gezeigt wurde, wirkt sich eine große Gurtwandstärke positiv auf die Ermüdungsfestigkeit aus. Aus diesem Grund wird die Geometriebedingung $t_0 \leq 8 \text{ mm}$ fortan nicht mehr gefordert. In Abschnitt 9.2.3 konnte außerdem gezeigt werden, dass eine lineare Interpolation zwischen den Kerbgruppen 80 und 50 in Abhängigkeit des Wandstärkenverhältnisses sinnvoll ist. Tabelle 10-47 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-47: Kerbfallempfehlung Detail 4

Table 10-47: Detail recommendation detail 4

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
$\frac{80}{m=5}$ $\frac{t_0}{t_i} \geq 1,4$			<p>④: N-Knoten mit Rechteck- oder Rundhohlprofilen und Überlappung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es sind getrennte Nachweise für Gurt und Diagonalen zu führen. • Bei Zwischenwerten von t_0/t_i ist zwischen den Kerbfallklassen linear zu interpolieren. • $t_i \leq 8 \text{ mm}$ • $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ • $\frac{b_0}{t_0} \leq 25$ bzw. $\frac{d_0}{t_0} \leq 25$ • $0,4 \leq \frac{b_i}{b_0} \leq 1$ bzw. $0,25 \leq \frac{d_i}{d_0} \leq 1$ • $b_0 \leq 200 \text{ mm}$ bzw. $d_0 \leq 300 \text{ mm}$ • $-0,5 h_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 h_0$ bzw. $-0,5 d_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 d_0$ • $e_{o/p} \leq 0,02 b_0$ bzw. $e_{o/p} \leq 0,02 d_0$ [$e_{o/p}$: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene] • $0,3 \leq \frac{q}{p} \leq 1$
$\frac{50}{m=5}$ $\frac{t_0}{t_i} = 1,0$				

10.9 Tabelle 8.8

Table 8.8

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen können alle acht Details der Tabelle 8.8 beurteilt werden. Jedoch ist bei einigen Details nur eine geringe Datenbasis vorhanden.

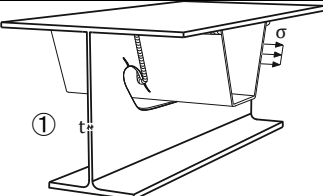

10.9.1 Durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger – Detail 1

Continuous longitudinal stringer with additional cut-out in cross girder – Detail 1

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.8.2 konnte für die durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger und einer Querträgerstegdicke von $t \leq 12 \text{ mm}$ ein Kerbfall von 112 abgeleitet werden. Dieses Ergebnis basiert jedoch nur auf 6 Einzelversuchen, sodass von einer Kerbfallhochstufung abgesehen wird. Über den Kerbfall von Längsrippenanschlüssen mit Querträgerstegdicken von $t > 12 \text{ mm}$ kann anhand der vorhandenen Daten keine Aussage getroffen werden. Tabelle 6-48 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-48: Kerbfallempfehlung Detail 1

Table 10-48: Detail recommendation detail 1

Kerbfall		Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
80	$t \leq 12 \text{ mm}$			Durchgehende Längsrippe mit Ausschnitt im Querträger.	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
71	$t > 12 \text{ mm}$				

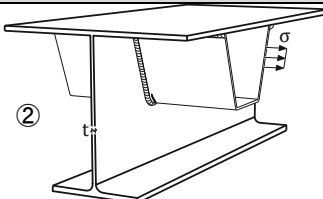

10.9.2 Durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger – Detail 2

Continuous longitudinal stringer without additional cut-out in cross girder – Detail 2

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 0 konnte Kerbfall 80 für die durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger und einer Querträgerstegdicke von $t \leq 12 \text{ mm}$ bestätigt werden. Über den Kerbfall von Längsrippenanschlüssen mit Querträgerstegdicken von $t > 12 \text{ mm}$ kann anhand der vorhanden Daten keine Aussage getroffen werden. Tabelle 10-49 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-49: Kerbfallempfehlung Detail 2

Table 10-49: Detail recommendation detail 2

Kerbfall		Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
80	$t \leq 12 \text{ mm}$			Durchgehende Längsrippe ohne Ausschnitt im Querträger.	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
71	$t > 12 \text{ mm}$				

10.9.3 Längsrippen am Querträger stoßen – Detail 3

Separate longitudinal stringer each side of the cross girder – Detail 3

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.8.4 wurde für den Anschluss der Längsrippe an den Querträger die Kerbfalleitung getrennt nach Schweißnahtausführung durchgeführt. Hierbei ergibt sich sowohl für HV- als auch für Kehlnähte eine Verbesserung des bisherigen Kerbfalls 36. In Anlehnung an [102] und auch aufgrund der begrenzten Menge an Quellen und einer potentiellen Fertigungsungenauigkeit dieses Details werden die Kerbfälle auf 56 und 40 festgelegt. Zudem wurde die Beschreibung von „Längsrippen am Querträger stoßen“ zur klareren Formulierung „Anschluss der Längsrippe an den Querträger“ geändert. Tabelle 10-50 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-50: Kerbfallempfehlung Detail 3

Table 10-50: Detail recommendation detail 3

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
56			Anschluss der Längsrippe an den Querträger	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. Die Ausmittigkeit der Rippen muss $\leq 15\%$ der Dicke des Querträgerstegs sein.
40				Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Schweißnaht zu führen. Die Ausmittigkeit der Rippen muss $\leq 15\%$ der Dicke des Querträgerstegs sein. $a \geq t$

10.9.4 Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung – Detail 4

Joint in rib with full penetration butt weld with steel backing plate – Detail 4

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.8.5 wurden verschiedene Kerbfälle für unterschiedliche Ausführungsformen des Rippenstoßes mit voll durchgeschweißter Stumpfnah mit Badsicherung abgeleitet, wie Tabelle 10-51 zeigt. Für kleine Wurzelspalte ergeben sich geringere Kerbfälle als bisher im Kerbfalkatalog berücksichtigt. Als neue Ausführungsform könnte der Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah und Siegelplatte eingeführt werden. Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.8.5 wurde hier Kerbfall 125 bestimmt, wobei dieses Detail in Untersuchungen von Kolstein [102] nur Kerbfall 112 aufweist und zusätzliche Anforderungen enthält. Es wird empfohlen, die Vorschläge aus [102] aufgrund der geringen Aussagekraft der kleinen Datenbasis zu übernehmen.

Tabelle 10-51: Kerbfallempfehlung Detail 4

Table 10-51: Detail recommendation detail 4

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Symbol	Beschreibung	Anforderungen
71	$g > 6 \text{ mm}$			Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah und Badsicherung	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. Die Haftnaht der Badsicherung ist nur innerhalb der späteren Stumpfnah zulässig. Schweißnahtanstiegswinkel $\geq 110^\circ$ Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen.
63	$4 \leq g \leq 6 \text{ mm}$				
36	$0 \leq g \leq 4 \text{ mm}$				
112				Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah und Siegelplatte	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. Die Haftnaht der Badsicherung ist nur innerhalb der späteren Stumpfnah zulässig. Schweißnahtanstiegswinkel $\geq 150^\circ$ Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. Umfang der ZFP nach EN 1090-2: 100% $g \geq 10 \text{ mm}$ $t \geq 20 \text{ mm}$

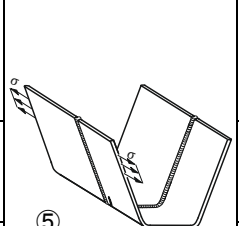

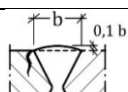
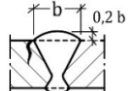
10.9.5 Von beiden Seiten voll durchgeschweißte Stumpfnah ohne Badsicherung – Detail 5

Full penetration butt weld in rib welded from both sides without backing plate – Detail 5

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.8.6 konnte keine konkrete Kerbfalleableitung für die drei Ausführungsformen des Details 5, Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah ohne Badsicherung, abgeleitet werden. Aus diesem Grund wird die bisherige Kerbfallklassifizierung beibehalten, siehe Tabelle 10-52. Der Beschreibungstext wurde klarer formuliert. Die Kerbfälle entsprechen denen der Tabelle 8.3, welche sich mit quer laufenden Stumpfnähten im Allgemeinen befasst. Der Blechdickeneffekt wird nicht mehr mit aufgenommen, da Rippen in der Praxis in dieser Dimensionen nicht vorkommen.

Tabelle 10-52: Kerbfallempfehlung Detail 5

Table 10-52: Detail recommendation detail 5

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen	
112			Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah; kerbfrei bearbeiteter Stumpfstoß	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen: Kerbfrei bearbeitete Stumpfnähte in Blechen gleicher Dicke. Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen.	
90				Stumpfstoß mit Schweißnaht-überhöhung $\leq 10\%$	Schweißnahtanstiegswinkel $\geq 150^\circ$ Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen.
80				Stumpfstoß mit Schweißnaht-überhöhung $\leq 20\%$	Schweißnahtanstiegswinkel $\geq 110^\circ$ Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen.

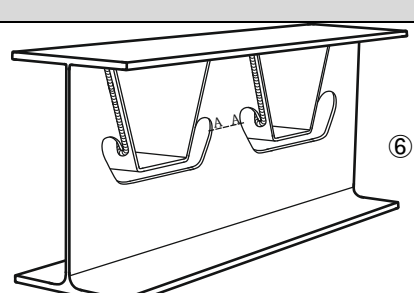
10.9.6 Kritischer Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten – Detail 6

Critical section in web of cross girder due to cut outs – Detail 6

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 0 wurde auf Basis von 12 Einzelversuchsergebnissen Kerbfall 140 für den kritischen Schnitt im Querträgersteg mit Ausschnitten bestimmt. Dieser liegt oberhalb des Kerbfalls 112 aus dem aktuellen Kerbfallkatalog. Aufgrund der geringen Datenbasis sollte Kerbfall 112 beibehalten werden. Der Kerbfall 112 wird explizit in die Kerbfallspalte übernommen.

Tabelle 10-53: Kerbfallempfehlung Detail 6

Table 10-53: Detail recommendation detail 6

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
71		Kritischer Schnitt A-A im Querträgersteg mit Ausschnitten.	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite im kritischen Schnitt A-A unter Berücksichtigung von Vierendeel Effekten zu führen.
112			Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite nach EN 1993-2, 9.4.2.2(3) zu führen.

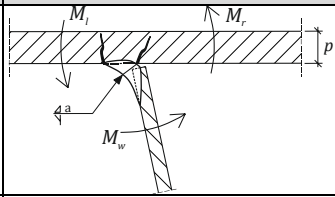

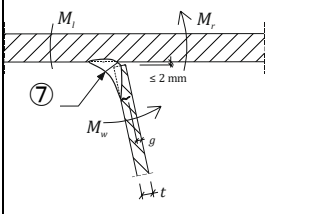

10.9.7 Versenkte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe – Detail 7

Partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib – Detail 7

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.8.8 konnte je nach Versagensort ein unterschiedlicher Kerbfall für die Naht zwischen Deckblech und Rippe abgeleitet werden. Es wird ein neues Detail fürs Deckblechversagen eingeführt. In Übereinstimmung mit [102] wird Kerbfall 125 empfohlen. Für das Rippenversagen bei der versenkten Naht ergibt sich Kerbfall 50. Tabelle 10-54 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-54: Kerbfallempfehlung Detail 7

Table 10-54: Detail recommendation detail 7

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
125			Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe: Versagen im Deckblech	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite im Deckblech zu führen: $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_l/r}{W_p}$ W_p ist mit p zu berechnen
50			Versagen in der Rippe bei einer versenkten Naht	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite infolge Blechbiegung in der Rippe zu führen: $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_w}{W_w}$ W_w ist mit t zu berechnen $a \geq t$ $g < 2 \text{ mm}$

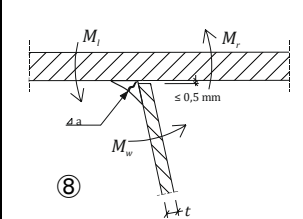

10.9.8 Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißte Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe – Detail 8

Fillet weld or partial penetration weld connecting deck plate to trapezoidal or V-section rib – Detail 8

Aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.8.9 wurde Kerbfall 63 für die Kehlnaht zwischen Deckblech und Rippe abgeleitet. Dabei ist zu beachten, dass die Enden der Rippen blechen zu schleifen sind, sodass sie bündig am Deckblech anliegen. Tabelle 10-55 zeigt die Kerbfallempfehlung.

Tabelle 10-55: Kerbfallempfehlung Detail 8

Table 10-55: Detail recommendation detail 8

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
63			Wurzelsversagen in der Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißten Naht, wenn nicht durch Kerbfall ⑦ abgedeckt	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite infolge Blechbiegung zu führen: $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_w}{W_w}$ W_w ist mit a zu berechnen $a \geq t$ Die Enden der Rippen blechen zu schleifen, sodass sie bündig ($\leq 0,5 \text{ mm}$) am Deckblech anliegen.

10.10Tabelle 8.9

Table 8.9

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen konnte lediglich der Hintergrund der Details der Tabelle 8.9 recherchiert werden, auf welchem die nachfolgend beschriebenen Kerbfallempfehlungen basieren.

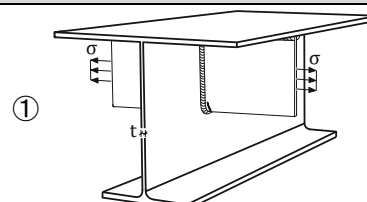

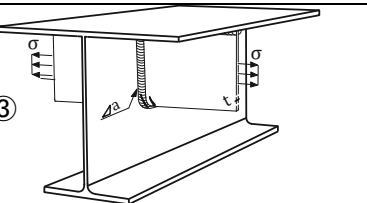
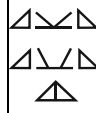
10.10.1 Anschluss der Längsrippe and den Querträger – Detail 1 und neues Detail 3

Connection of longitudinal stringer – Detail 1 and new detail 3

Das Detail 1 sollte nach Schlussfolgerung aus Abschnitt 6.9.4 als durchgehende Längsrippe behandelt werden. Als weiteres Detail sollte die nichtdurchgehende Rippe als Detail 3 ergänzt werden. Der Querträgersteg wird wie gehabt durch Detail 2 nachgewiesen.

Tabelle 10-56: Kerbfallempfehlung Detail 1 und neues Detail 3

Table 10-56: Detail recommendation detail and new detail 3

Kerbfall		Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
80	$t \leq 12mm$			Anschluss einer durchgehenden Längsrippe an den Querträger	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
71	$t > 12mm$				
36				Anschluss einer Längsrippe an den Querträger.	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. $a \geq 0,5t$

Der Hintergrund der Details und der in Abschnitt 6.9.4 beschriebene, mögliche Übertragungsfehler muss zukünftig noch abschließend geklärt werden.

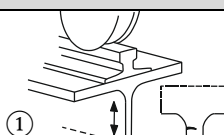
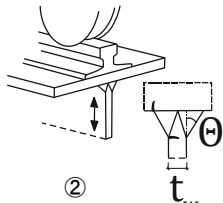
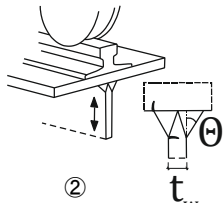
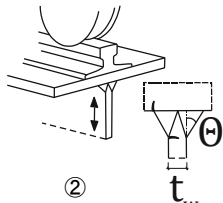
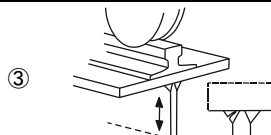

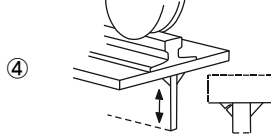

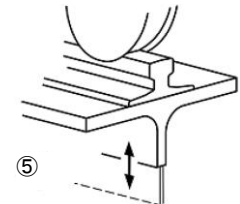



10.11 Tabelle 8.10

Table 8.10

Wie in Abschnitt 6.10 erläutert, werden die hier vorgestellten Kerbfallempfehlungen Untersuchungen der Universität Stuttgart [107, 108] und der RWTH Aachen [109, 110] entnommen, siehe Tabelle 10-57.

Tabelle 10-57: Kerbfallempfehlung Tabelle 8.10

Table 10-57: Detail recommendation for table 8.10

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Symbol	Beschreibung	Anforderungen
160			nicht geschweißt	Walzquerschnitt mit lastverteilendem Oberflansch mit Radlasteinleitung	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung im Steg nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7
140	$t_w \leq 30mm$	$5^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$		Voll durchgeschweißer T-Stumpfstoß: DHV-Naht (K-Naht) mit Doppelkehlnaht (symmetrisch)	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung im Steg nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7 – Durchgeschweißt – Wurzel ausgeräumt – Nahtübergänge kerbfrei; erforderlichenfalls bearbeitet
125	$30 < t_w \leq 50mm$				
100	$50 < t_w \leq 100mm$				
112	$t_w \leq 30mm$	$15^\circ < \theta \leq 45^\circ$		Voll durchgeschweißer T-Stumpfstoß: HV-Naht mit Kehlnaht und gegengeschweißer Kapplage	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung im Steg nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7 – Durchgeschweißt – Wurzel ausgeräumt – Nahtübergänge kerbfrei; erforderlichenfalls bearbeitet
100	$30 < t_w \leq 50mm$				
80	$50 < t_w \leq 100mm$				
90	$t_w \leq 30mm$	$5^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$		Voll durchgeschweißer T-Stumpfstoß: HV-Naht mit Kehlnaht und gegengeschweißer Kapplage	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung im Steg nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7 – Durchgeschweißt – Wurzel ausgeräumt – Nahtübergänge kerbfrei; erforderlichenfalls bearbeitet
80	$30 < t_w \leq 50mm$				
71	$50 < t_w \leq 100mm$				
50				nicht durchgeschweißer T-Stoß mit Radlasteinleitung mit $a/t \leq 0,7$ a = Einzelnahtdicke t = Stegdicke	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung in der Schweißnaht nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7
50				T-Stoß mit Doppelkehlnaht und Radlasteinleitung mit $a/t \leq 0,7$ a = Einzelnahtdicke t = Stegdicke	Hinweis: Für Nähte mit $a/t > 0,7$ kann auch Versagen am Schweißnahtübergang auftreten. Für diese Nähte ist die Spannungsschwingbreite im Steg zu berechnen.
100				durchgeschweißer Anschluss eines Gurtprofils an den Steg mit Radlasteinleitung	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung im Steg nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7
50				wie vor, jedoch nicht durchgeschweißt mit $a/t \leq 0,7$ a = Einzelnahtdicke t = Stegdicke	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung in der Schweißnaht nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7 Hinweis: Für Nähte mit $a/t > 0,7$ kann auch Versagen am Schweißnahtübergang auftreten. Für diese Nähte ist die Spannungsschwingbreite im Steg zu berechnen.
50				wie vor, jedoch mit Doppelkehlnaht mit $a/t \leq 0,7$ a = Einzelnahtdicke t = Stegdicke	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung in der Schweißnaht nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7 Hinweis: Für Nähte mit $a/t > 0,7$ kann auch Versagen am Schweißnahtübergang auftreten. Für diese Nähte ist die Spannungsschwingbreite im Steg zu berechnen.

11 Diskussion der Projektergebnisse

Discussion of project results

Die Hauptmotivation des Projektes entspringt der Tatsache, dass die experimentelle Grundlage des Kerbfallkataloges in EN 1993-1-9 [1] unklar ist und die Einstufung zahlreicher Details schlechter als im Vergleich zu früheren nationalen Normen ausgefallen ist. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen konnte die Datenbasis der Ermüdungsdetails hinreichend aufgearbeitet werden. Dabei sind folgende Erkenntnisse besonders hervorzuheben:

- Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Auswertmethode für Ermüdungsversuche ist für die Auswertung großer Datenmengen geeignet.
- Die statistischen Ansätze erfüllen die Voraussetzungen zur statistischen Bewertung in Eurocode 0.
- Mithilfe des innovativen Datenbanksystems, dessen Struktur individuell auf die Erfassung von Ermüdungsversuchsdaten ausgelegt ist, kann die große Anzahl an unterschiedlichsten Versuchsdaten effizient gespeichert, selektiert und ausgewertet werden.
- Nach umfassender Recherche ist für einige Details keine bzw. nur eine sehr geringe Anzahl an Versuchsergebnissen bekannt. Daher gilt es als naheliegend, dass deren Kerbfalleinstufung auf Einschätzung oder in Orientierung an verwandten Details erfolgt ist.
- Einige Kerbdetails können auf Basis der hier vorgestellten Untersuchungen neu eingestuft werden. Dies betrifft im Wesentlichen Hochstufungen, aber genauso auch einige Herabstufungen von Details. Auf Grundlage der für einige Details vorliegenden, sehr umfangreichen Datenbasis kann somit eine realitätsnähere, global betrachtete Kerbfallklassifizierung erfolgen.
- Bei einigen Details kann ein im derzeitigen Kerbfallkatalog vorausgesetzter Einfluss, wie z.B. der Geometrieinfluss, auf Basis der hier präsentierten Untersuchungen nicht als signifikant festgestellt werden. Hier wird die Kerbfalleinstufung vereinfacht.
- Bei einigen Details wurden in verschiedenen Serien Versuchskörper zur experimentellen Bewertung der Ermüdungsfestigkeit herangezogen, deren Geometrien sich sehr ähneln. Hier ist unklar, welchen Einfluss abweichende Geometrien, z.B. sehr dicke Bleche oder bauteilähnliche Versuchskörper, auf die Ermüdungsfestigkeit haben.
- Ferner konnten zusätzliche Einflussgrößen, die bisher im Kerbfallkatalog nicht berücksichtigt werden, als signifikant herausgestellt werden. Diese werden in der neuen Kerbfallempfehlung berücksichtigt.
- Einige relevante Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit, wie Maßstabeffekt, Mittelspannungseinfluss, Bauteil- oder Streckgrenzeinfluss können nur bei ausgewählten Details als signifikant nachgewiesen werden. Bei den meisten Details treten diese Größen aufgrund der zahlreichen Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit und der damit einhergehenden großen Streuung in den Hintergrund.
- Für die fehlenden bzw. unzureichend klassifizierten Details „Gurtlamellenende“ und „Stirnplattenstoß“ wurden neue Kerbfallempfehlungen abgeleitet.

12 Analyse und Bewertung

Analysis and Evaluation

Kurzfassung

Im Rahmen dieses Kapitels werden die erzielten Ergebnisse des Projektes den Zielen gegenübergestellt.

Abstract

The following chapter evaluates the results of the current project and compares these results with the aims of the proposal.

Die durch die Förderung erzielten Ergebnisse wurden in den vorherigen Kapiteln ausführlich beschrieben und werden nachfolgend den vorgegebenen Zielen im Einzelnen gegenübergestellt. Hierzu wird angegeben inwiefern diese vollständig oder teilweise erfüllt wurden und welche Änderungen von Zielen im Projektverlauf durch den projektbegleitenden Ausschuss vorgenommen wurden:

Ziel 1: Entwicklung einer einheitlichen Vorgehensweise bei der statistischen Bewertung der Versuchsdaten und Konzeptentwicklung zur Berücksichtigung wesentlicher Einflüsse

Das Ziel 1 wurde vollständig im Sinne des Antrags erreicht. Alle zur Erreichung des Teilziels durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Siehe Abschnitt 3.

Ziel 2: Verbesserung des Kerbfallkatalogs des Eurocodes durch Einbeziehung vorhandener und neuerer Versuchsergebnisse und Entwicklung einer neuen Datenbank

Das Ziel 2 wurde vollständig im Sinne des Antrags erreicht. Alle zur Erreichung des Teilziels durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Siehe Abschnitte 4, 5, 6, 9, 10 und Anhang A.

Ziel 3: Erweiterung des Kerbfallkatalogs um bisher unbefriedigend oder nicht abgedeckte branchenspezifische Konstruktionsdetails durch eigens durchgeführte Ermüdungsversuche

Das Ziel 3 wurde vollständig im Sinne des Antrags erreicht. Alle zur Erreichung des Teilziels durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen. Siehe Abschnitte 7 und 8.

13 Zusammenfassung

Summary

In vielen Bereichen unserer Infrastruktur, wie z. B. im Brückenbau, im Kran- bzw. Kranbahnbau und auch im Hochbau oder Schornstein- und Mastbau unterliegen Stahlkonstruktionen zyklischen Beanspruchungen, die den Nachweis gegen Ermüdung erfordern. Eine große Bedeutung kommt bei der Auslegung solcher hochbeanspruchter Konstruktionen im Bauwesen dem Kerbfallkatalog in DIN EN 1993-1-9 [1] zu, der die Ermüdungsfestigkeit spezifischer Konstruktionsdetails regelt. Eigentlich sollen Normen zu sicheren Nachweisen führen, dabei jedoch nicht überkonservativ sein, um im Sinne der Ressourcenschonung auch eine wirtschaftliche Dimensionierung zu ermöglichen. Tatsächlich kann man zeigen, dass im Vergleich zu früheren deutschen Normen oder Regelwerken anderer Bereiche der Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 [1] in vielen Fällen zu konservativeren d.h. wirtschaftlich schlechteren Ergebnissen führt. Die Basis des Kerbfallkatalogs stammt aus 1989 und älter und neuere Erkenntnisse sind bisher nicht eingegangen. Die Versuchsdaten wurden seinerzeit nach Verfahren zusammengestellt und ausgewertet, die nicht mehr dem heutigen Stand der Technik entsprechen, oder mit deutlichen Sicherheitszuschlägen versehen wurden.

Außerdem hat die Bearbeitung des Projekts gezeigt, dass doch verhältnismäßig viele und wichtige Details nur wenig mit Versuchsdaten belegt sind, sondern aus ingenieurmäßigen Überlegungen, orientiert an anderen Details oder auch an numerischen Untersuchungen, gewählt wurde. Diese können aber nicht immer bestätigt werden.

Aus diesem Grund zielte das hier präsentierte Forschungsvorhaben auf die Erarbeitung von Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Kerbfallkataloges in DIN EN 1993-1-9 [1] bezogen auf Konstruktionsdetails des Stahl- und Verbundbrückenbaus, Kran- und Kranbahnbaus sowie des Mast- und Schornsteinbaus ab. Dabei wurde die Versuchsgrundlage des vorhandenen Kerbfallkatalogs nach DIN EN 1993-1-9 [1, 4] in für die Praxis wesentlichen Bereichen kritisch hinterfragt und mit modernen statistischen Verfahren neubewertet, sowie um aktuelle Forschungsergebnisse und -versuche erweitert. Hierzu wurden statistische Auswertemethoden evaluiert sowie eine moderne Datenbankstruktur entwickelt. Ferner wurde der Kerbfallkatalog um fehlende bzw. nicht hinreichend klassifizierte Details ergänzt: Dies betrifft neue Details des Gurtlamellenendes und des Stirnplattenstoßes mit vorgespannten Schrauben. Als wichtigstes Ergebnis des Projektes wurden verbesserte Kerbfalltabellen für eine wirtschaftlichere, differenzierte und sicherere Ermüdungsbemessung vorgeschlagen.

Aufgrund neu identifizierter Lücken in Ermüdungsversuchsdatenbasis bleiben einige Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit ungeklärt. Zur Lösung dieser Problemstellung ist die Durchführung weiterer Forschung erforderlich.

14 Ausblick

Perspective

Im Ermüdungskontext stellen Versuchsdaten eine unverzichtbare Wissensgrundlage dar. Im Rahmen des vorgestellten Forschungsprojektes wurde die Datenbasis des Kerbfallkataloges in DIN EN 1993-1-9 [1] strukturiert aufgearbeitet. In Zukunft kann das entwickelte Datenbanksystem kontinuierlich durch weitere, insbesondere neuere, Versuchsdaten erweitert werden, sodass die Datenbasis immer größer und zuverlässiger wird und eine Vielzahl an ermüdungsrelevanter Einflussgrößen abdecken kann.

Darüber hinaus sind in den vorgestellten Untersuchungen einige offene Fragen in der Datenbasis des Kerbfallkatalogs aufgefallen, die zukünftig durch ergänzende Untersuchungen sukzessive geschlossen werden sollten. Dies betrifft Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit, die experimentell bisher nicht ausreichend festgestellt werden konnten. Einige Details weisen im Kerbfallkatalog einen Größeneffekt auf, dessen Ausprägung bisher nicht bekannt ist. Abgesehen von den Größeneinflüssen besteht zudem ein Forschungsbedarf hinsichtlich der Einflüsse der Fertigung und der Toleranzabweichungen. Schweißverbindungen können Fertigungsfehler, metallurgische Veränderungen des Grundwerkstoffs oder auch innere Unregelmäßigkeiten enthalten, die durch die vorhandenen Kerbfälle und ihre bisherige Datenbasis nicht differenzierbar sind. Weiterführend könnte zukünftig das Kerbspannungskonzept angewendet werden, um die Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen mit Imperfektionen auf wirtschaftliche Weise beurteilen zu können und im Zweifelsfall schwierige Diskussionen sowie unnötige Nachbesserungen zu vermeiden.

15 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen

List of publications related to the project

Bereits veröffentlichte Dokumente:

- [Sch17] Schmitz, S.: Analyse von Ermüdungsversuchen zur Neubewertung von Kerbfallklassen ausgewählter Details nach DIN EN 1993-1-9. Bachelorarbeit, Institut für Stahlbau der RWTH-Aachen, 201
- [Leh17] Lehman, T.: Statistische Auswertung von Ermüdungsversuchen – Bachelorarbeit, Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2017-17X, 2017
- [Bar18] Bartsch, H.: Feldmann, M.: Assessment of fatigue tests to review detail categories of EC3. IABMAS 2018, 2018
- [Gae18] Gärtner, T.: Erstellung einer interaktiven Datenbankanwendung zur Untersuchung wichtiger Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit verschiedener Kerbdetails. Bachelorarbeit, Institut für Stahlbau der RWTH-Aachen, 2018
- [Sch18] Scholz, A.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Gurtlamellenenden – Masterarbeit, Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2018-54X, 2018
- [Dre18] Drebenstedt, K., Scholz, A.: Versuchsbericht der Ermüdungsversuche am Konstruktionsdetail Gurtlamellenende – Versuchsbericht, Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2018-57X, 2018
- [Gei18] Geiger, S.: Analyse, Neubewertung und Erweiterung des Kerbdetails „Quersteife“ nach Eurocode 3 – Bachelorarbeit, Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2018-56X, 2018
- [Bra19] Brauweiler, N.: Recherche und Auswertung von Ermüdungsversuchen zur Ergänzung der Neubewertung von Kerbfallklassen im EC 3-1-9. Bachelorarbeit, Institut für Stahlbau der RWTH-Aachen, 2019
- [Rit19] Rittich, N.: Numerische Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von T-Stößen mit vorgespannten Schrauben. Bachelorarbeit, Institut für Stahlbau der RWTH-Aachen, 2019
- [Kuh19] Kuhmann, L.: Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Stirnplattenverbindungen mit vorgespannten Schrauben. Masterarbeit, Institut für Stahlbau der RWTH-Aachen, 2019
- [Sch19] Schröder, C.: Analyse von Ermüdungsversuchen an Details von orthotropen Platten zur Bewertung von Kerbfallklassen des EC 3-1-9. Bachelorarbeit, Institut für Stahlbau der RWTH-Aachen, 2019

- [The19] Theunissen, E.: Numerical investigations on geometry influences during fatigue of bolted joints with prestressed bolts. Bachelorarbeit, Institut für Stahlbau der RWTH-Aachen, 2019
- [Fel19] Feldmann, M.; Bartsch, H.; Kuhlmann, U.; Drebenstedt, K.; Ummenhofer, T.; Seyfried, B.: Auswertung von Ermüdungsversuchsdaten zur Überprüfung von Kerbfallklassen nach EC 3-1-9, Stahlbau Vol. 88, Nr. 10, 2019
- [Bar19] Bartsch, H.; Hoffmeister, B.; Feldmann, M.: Investigations on the fatigue behavior of end plate connections with prestressed bolts, Fatigue Design 2019, Senlis, Frankreich, 2019
- [Glo19] Gloria, H.: Analyse Neubewertung und Erweiterung des Kerbdetails „Stumpfstoß“ bezüglich Ermüdung nach DIN EN 1993-1-9 – Masterarbeit, Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2019-7X, 2019

Vorgesehene Veröffentlichungen:

- Bartsch, H.; Feldmann, M.; Drebenstedt, K.; Kuhlmann, U.; Seyfried, B.; Ummenhofer, T.: Analysis of fatigue test data to assess detail categories according to EC 3-1-9, 2020
- Bartsch, H.; Feldmann, M.: Fatigue analysis of welds and bolts in end plate connections, 2020
- Veröffentlichung der Projektergebnisse in der Fachzeitschrift „Stahlbau“, 2020
- Fritz, J.: Numerische Parameterstudie zur Ermüdungsfestigkeit geschweißter Kreuzstoß- und Laschenverbindungen unter Berücksichtigung von Versuchsergebnissen. Masterarbeit, Institut für Stahl- und Leichtbau – Karlsruher Institut für Technologie, 2020

16 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Transfer to the economy

Maßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Rahmen	Zeitraum
Aktiver Dialog mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschuss während der Projektlaufzeit und		fortlaufend
Arbeitskreissitzungen im projektbegleitenden Ausschuss	Sitzungen der Fachgemeinschaft Brückenbau	24.11.2016 08.05.2017 14.11.2017 17.05.2018 05.12.2018 08.04.2019 19.11.2019
Betreuung von Bachelor- und Masterarbeiten	Siehe Abschnitt 15	fortlaufend
Zusammenarbeit mit ECCS TC6 und Empfehlung von verbesserten Kerbfalltabellen als Vorschlag für europäische Normen	ECCS TC6 Meetings	halbjährlich
Veröffentlichung wissenschaftlicher Publikationen in mehreren Fachzeitschriften	Fachzeitschrift Stahlbau	10/2019
Teilnahme an nationalen und internationalen Konferenzen	IABMAS Fatigue Design	07/2018 10/2019
Lehre und Weiterbildung von Tragwerksplanern aus KMU, Ingenieurwissenschaftliche Ausbildung, Ingenieurwissenschaftliche Weiterbildung		fortlaufend

Maßnahmen nach Projektende

Maßnahme	Rahmen	Zeitraum
Teilnahme an nationalen und internationalen Konferenzen	IABSE 2020	09/2020
Veröffentlichung wissenschaftlicher Publikationen in mehreren Fachzeitschriften	Fachzeitschriften: - Steel Construction - International Journal of Fatigue	2020 / 2021
Lehre und Weiterbildung von Tragwerksplanern aus KMU	Wissensvermittlung in Weiterbildungsveranstaltungen des konstruktiven Ingenieurbaus (Seminare der FOSTA, VDI)	fortlaufend
Empfehlung von verbesserten Kerbfalltabellen als Vorschlag für europäische Normen	Umsetzung der Forschungsergebnisse in die prEN 1993-1-9:2020	Halbjährlich im Rahmen der Sitzungen des Normungsgremiums ECCS TC6 / SC3-T8
Ingenieurwissenschaftliche Ausbildung	Wissensvermittlung im Rahmen von Lehrveranstaltungen des Konstruktiven Ingenieurbaus	fortlaufend

17 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept

Aufgrund der vielfältigen Transfermaßnahmen und insbesondere der direkten Einbringung der Ergebnisse in Normungsgremien werden die Anforderungen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen erfüllt.

18 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

Presentation of the scientific-technological and economic benefits of the results

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde der Hintergrund des Kerbfallkataloges in DIN EN 1993-1-9 [1] recherchiert, gefiltert und neu ausgewertet. Ferner wurden bisher nicht bzw. nur unzureichend klassifizierte Kerbdetails hinzugefügt. Mithilfe der Entwicklung eines Datenbanksystems werden die Versuchsergebnisse und ermüdungsrelevanten Informationen der Versuchsserien dauerhaft und flexibel gespeichert.

Der wissenschaftlich-technische Nutzen besteht daher insbesondere in der dauerhaften Speicherung sämtlicher für die Kerbfallklassifizierung relevanten Versuchsdaten. Das Datenbanksystem kann zukünftig kontinuierlich weiterentwickelt und erweitert werden, so dass die Datenbasis für Kerbfallableitungen auch zukünftig besteht und wächst. Ferner besteht der wissenschaftlich-technische Nutzen in der Erforschung von Einflussparametern auf die Ermüdungsfestigkeit bestimmter Details. So konnten neue, bisher nicht berücksichtigte Einflüsse herausgearbeitet werden. Ferner wurde ebenfalls gezeigt, dass einige Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit, welche aktuell berücksichtigt werden, nicht signifikant sind.

Der wirtschaftliche Nutzen der erzielten Ergebnisse zeigt sich darin, dass einige Kerbdetails höher eingestuft werden können, was eine höhere Ausnutzung der Stahlbaudetails ermöglicht. Hierdurch lassen sich die erforderlichen Blechdicken teils beträchtlich reduzieren, was indirekt auch zur Einsparungen von Schweißarbeiten und Schweißzusatzwerkstoff führt. Somit werden die Wirtschaftlichkeit und die Konkurrenzfähigkeit von Stahlkonstruktionen gegenüber massiven Tragwerksstrukturen verbessert. Neben der Stahlindustrie kann von diesen Entwicklungen auch der üblicherweise mittelständische deutsche Stahlbau profitieren.

Die Erkenntnisse, die im Rahmen dieses Forschungsprojekts gewonnen wurden, sind umgehend in die zuständigen Normungsgremien eingebracht worden, um eine Diskussionsgrundlage zur Anpassung der aktuellen normativen Regelungen zu bieten und somit den beschriebenen Nutzen zu schaffen.

19 Literaturverzeichnis

Literature

- [1] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung – Deutsche Fassung, 2010.
- [2] K. Drebenstedt, Ermüdungsfestigkeit von Konstruktionsdetails mit aufgeschweißten und aufgelöteten Bauteilen, Dissertation, Stuttgart, 2021 (in Vorbereitung) .
- [3] DIN EN 1090, Anforderungen für die Ausführung von Stahlbauten, 2019.
- [4] Sedlacek, G.; et al., „Commentary to Eurocode 3: EN 1993 - Part 1-9 - Fatigue,“ unveröffentlicht, Aachen, 2016.
- [5] M. Vormwald und D. Radaj., Ermüdungsfestigkeit - Grundlage für Ingenieure - 3. Ausgabe, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [6] DIN ENV 1993, „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau,“ 1993.
- [7] G. Sedlacek und C. Müller, „Die Neuordnung des Eurocode 3 für die EN-Fassung und der neue Teil 1.9 – Ermüdung,“ *Stahlbau*, Bd. 69, Nr. 4, pp. 228 - 235, 2000.
- [8] M. Hirt; et al, „Recommendation For the Fatigue Design of Steel Structures,“ ECCS - Technical Committee 6 - Fatigue, Lausanne, 1985.
- [9] Background Documentation Chapter 9, „Document 9.01 - Eurocode No. 3 - Design of Steel Structures - Part 1 - General Rules and Rules for Buildings,“ 1989.
- [10] DIN EN 1993-1-10: Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung, 2010.
- [11] DIN EN 1991: Eurocode 1, Einwirkungen auf Tragwerke, 2010.
- [12] DIN EN 1993: Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, 2019.
- [13] DIN EN 1993-2: Eurocode 3, „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken,“ 2010.
- [14] A. Palmgren, „Die Lebensdauer von Kugellagern (Life Length of Roller Bearings or Durability of Ball Bearings),“ *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (ZVDI)*, Bd. 14, pp. 339 - 341, 1924.
- [15] M. Miner, „Cumulative damage in fatigue,“ *Journal of Applied Mechanics*, Bd. 12, Nr. 3, pp. A159 - A164 , 1945.

- [16] A. F. Hobbacher, „Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components - Second Edition - IIW document IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13,“ International Institute of Welding, Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [17] FKM-Richtlinie, „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile - 6. überarbeitete Ausgabe,“ Forschungskuratorium Maschinenebau (FKM) , Frankfurt / Main, 2012.
- [18] DIN EN 13001-3-1, „Krane – Konstruktion allgemein – Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken,“ 2019.
- [19] DIN EN ISO 5817, „Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten,“ 2014.
- [20] DIN EN 13001-2, „Kransicherheit – Konstruktion allgemein – Teil 2: Lasteinwirkungen,“ 2019.
- [21] DIN EN 10163, „Lieferbedingungen für die Oberflächenbeschaffenheit von warmgewalzten Stahlerzeugnissen (Blech, Breitflachstahl und Profile),“ 2007.
- [22] M. Feldmann, B. Eichler, S. Schaffrath und J. Stötzel, „Ermüdungsfestigkeitsnachweise für den Kranbau nach verschiedenen Regelwerken,“ *Stahlbau*, Bd. 82, Nr. 4, pp. 250 - 263, 2013.
- [23] W. Fricke, „Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures,“ International Institute of Welding, Hamburg, 2008.
- [24] H. Neuber, „Theory of Notch Stresses: Principle for Exact Stress Calculations,“ Edwards, Ann Arbor, 1946.
- [25] D. Radaj, „Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures,“ Abington Publ, Cambridge, 1990 .
- [26] D. Radaj, C. M. Sonsino und W. Fricke, „Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches - 2nd Edition,“ Woodhead Publishing, Abington, 2006.
- [27] H. Neuber, „Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen,“ *Konstruktion*, Bd. 20, Nr. 7, pp. 245-251, 1968.
- [28] A. Hobbacher et al., „Industrielle Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen,“ DVS Ausschuss für Technik, Düsseldorf, 2017.
- [29] W. Fricke, „Round Robin Study on Stress Analysis for the Effective Notch Stress Approach,“ IIW Document XIII-2129-06/XV-1223-06, 2006.
- [30] Schütz, W., „Zeit- und Betriebsfestigkeit gekerbter Flachstähle aus 3.4364.7 - LBF-technisch Mitteilung TM 43/48,“ in *Veröffentlichungen, Berichte und Technische*

-
- Mitteilungen des Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), früher Laboratorium für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt, 1968.*
- [31] E. Haibach, Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, Springer-Verlag, 2006 (3. Auflage).
- [32] D. Radaj, Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten., Vieweg, 1993.
- [33] T. R. Gurney, „The Influence of Thickness on the Fatigue Strength of Welded Joints,“ *Second International Conference on Behaviour of Off-Shore Structures*, Bd. 41, pp. 523-534, 1979.
- [34] T. R. Gurney, The Fatigue Strength of Transverse Fillet Welded Joints - A Study of the Influence of joint geometry, Abington Publishing, 1991.
- [35] S. Maddox, The Effect of Plate Thickness on the Fatigue Strength of Fillet Welded Joints, 1987.
- [36] O. Örjasäter, „Effect of Plate Thickness in Fatigue of Welded Components,“ *IW Doc XIII-1582-95, XV-890-95*, 1995.
- [37] H. H. Minner und T. Seeger, „Schwingfestigkeitsuntersuchung an MAGM geschweißten Stumpf- und Kehlnahtverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen StE47 und StE70,“ *Oerlokonschweißmittelungen*, Bd. 36, Nr. 83, pp. 13-23, 1978.
- [38] N. E. Frost und K. Denton, „The Fatigue Strength of Butt Welded Joints in Low Alloy Structural Steels,“ *British Welding Journal*, Bd. 14, Nr. 4, pp. 157-163, 1967.
- [39] I. Yamaguchi, Y. Terada und A. Nitta, „On the Fatigue Strength of Steels for Ship Structures,“ *IW-Document XIII-425-66*, 1966.
- [40] R. Puthli, S. Heroin, J. Bergers, G. Sedlacek, C. Müller, J. Stötzel, S. Höhler, Ö. Bucak und J. Lorenz, „Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Krankonstruktionen bei Einsatz hoch- und ultrahochfester Stähle,“ FOSTA P 512, 2006.
- [41] L. E. Friis und E. R. Steneroth, „Fatigue Strength of Welded Joints in Mild and High-Strength Structural Steels,“ *Jernkontoret*, Bd. Ann. 152, pp. 157-169, 1968.
- [42] T. R. Gurney und G. C. Smith, „Fatigue tests on 1,5 in. thick transverse butt welds containing slag inclusions,“ *British Welding Journal*, Bd. 14, Nr. 1, pp. 17-38, 1967.
- [43] K. Odegard und P. Hembre, „Fatigue Tests of Shipbuilding Steel Part 2: Tests with notched and welded test pieces of "high tensile" and ordinary ship building steel,“ *IW Doc-XIII-598-70*, 1970.
-

-
- [44] L. A. Harris und G. E. Nordmark, „The Fatigue and Static Properties of Butt Welds in Structural Steels,“ *Civil Engineering Studies*, Bd. Structural Research Series No. 81, 1954.
- [45] R. P. Newman und T. R. Gurney, „Fatigue Tests of Plain Plate Specimens and Transverse Butt Welds in Mild Steel,“ *British Welding Journal*, Bd. 6, Nr. 12, pp. 569-594, 1959.
- [46] T. R. Gurney, „Fatigue Tests on Butt and Fillet Welded Joints in Mild and High Tensile Structural Steels,“ *British Welding Journal*, Bd. 9, Nr. 11, pp. 614-620, 1962.
- [47] O. H. Basquin, „The exponential law of endurance tests,“ *American Society for Testing and Materials Proceedings*, Nr. 10, pp. 625 - 630, 1910.
- [48] N. Draper und H. Smith, *Applied Regression Analysis*, New York: John Wiley, 1966.
- [49] E. Haibach, R. Olivier und F. Finaldi, „Statistical design and analysis of an interlaboratory program on the fatigue data for welded joints in structural steel,“ *ASTM STP*, Bd. 744, pp. 24 -54, 1981.
- [50] P. D. T. Caiza und T. Ummenhofer, „Consideration of the runouts and their subsequent retests into S-N curves modelling based on a three-parameter Weibull distribution,“ *International Journal of Fatigue*, Bd. 106, pp. 70 - 80, 2018.
- [51] T. Lassen, P. Darcis und N. Recho, „Fatigue Behaviour of Welded Joints Part 1 - Statistical Methods for Fatigue Life Prediction,“ *Supplement to the Welding Journal*, pp. 183 - 187, 2005.
- [52] DIN EN 1990: Eurocode 0, Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, 2010.
- [53] G. J. Hahn und W. J. Meeker, *Statistical Intervals - A Guide for Practitioners*, New York: Wiley, 1991.
- [54] M. Holicky, *Basic statistical concepts and technique - Implementation of Eurocodes Handbook 2 Reliability Backgrounds*, Leonardo Da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007, 1975.
- [55] K. Drebenstedt und M. Euler, „Statistical Analysis of Fatigue Test Data according to Eurocode 3,“ in *Proceedings of IABMAS 2018*, Melbourne, 2018.
- [56] DIN EN ISO 2553, „Schweißen und verwandte Prozesse – Symbolische Darstellung in Zeichnungen – Schweißverbindungen,“ 2017.
- [57] DIN EN ISO 4063, „Schweißen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern,“ 2011.
- [58] DIN EN ISO 6947, „Schweißen und verwandte Prozesse – Schweißpositionen,“ 2018.
-

-
- [59] Oracle and/or its affiliates, MySQL 5.1 Referenzhandbuch, 2010.
- [60] „www.bigdata-insider.de,“ Vogel Communications Group GmbH & Co.KG, 2019. [Online]. Available: <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-mysql-a-614184/>. [Zugriff am 21 08 2019].
- [61] „<https://www.a-coding-project.de>,“ a coding project GmbH, 2019. [Online]. Available: <https://www.a-coding-project.de/ratgeber/mysql>. [Zugriff am 21 08 2019].
- [62] E. Schicker, Datenbanken und SQL - Eine praxisorientierte Einführung mit Anwendungen in Oracle, SQL Server und MySQL - 5. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [63] B. www.bauforumstahl.de, „Kerbfalldatenbank,“ ab 2020 (in Bearbeitung).
- [64] DIN EN 1993-1-8: Eurocode 3, „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen,“ 2010.
- [65] U. Guerrero, „How the Categories of the Constructional Details were Generated - Commentary to Appendix B of the Recommendations for the fatigue design of steel structures of the European Convention for Constructional Steelwork,“ 1986.
- [66] G. Müller und V. Gregor, „Ein Beitrag zum Problem der Dauerfestigkeit geschweißter Verbindungen aus Stählen höherer Festigkeit,“ *Mitteilung aus dem Zentralinstitut für Schweißtechnik ZIS*, Bd. 7, Nr. 10, pp. 1394-1414, 1965.
- [67] J. D. Harrison, „Further fatigue tests of 1 1/2 in. thick butt welds containing slag inclusions,“ *British Welding Journal*, Bd. 15, Nr. 2, pp. 85-94, 1968.
- [68] R. Olivier und W. Ritter, Wöhlerlinienkatalog für Schweissverbindungen aus Baustählen Teil 1: Stumpfstoß - Bericht Nr. FB-151 (1979), Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH, 1979.
- [69] T. R. Gurney und S. J. Maddox, „A re-analysis of fatigue data for welded joints in steel,“ *Welding Research International*, Bd. 3, Nr. 4, 1973.
- [70] P. Berger, „Zur Tragfähigkeit von Stumpfnähten bei Ermüdungsbeanspruchung,“ *Schweißtechnik*, Bd. 34, Nr. 9, pp. 410-414, 1984.
- [71] O. D. Dijkstra, J. Wardenier und A. A. Hertogs, „The fatigue behaviour of welded splices with and without gusset holes in IPE 400 and HEM 320 beams,“ in *International Conference on Weld Failures*, London, 1988.
- [72] M. H. Kim und H. J. Kim, 21 Februar 2011. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954406211403570>. [Zugriff am 19 Oktober 2018].
- [73] U. Kuhlmann, K. Drebenstedt und K. Kudla, „Fatigue classification of lamellae joints, Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2016-23X,“ Institute of Structural Design, Stuttgart, 2016.
-

-
- [74] T. Gurney und L. Nekanda Trepka, „Influence of Local Heating on Fatigue Behaviour of Welded Specimens,“ *British Welding Journal*, Bd. 6, Nr. 10, pp. 491-497, 1959.
- [75] Commission des Communautés Européennes, „Etude du comportement en fatigue classique de joints types soudés de qualité industrielle,“ Bruxelles, 1975.
- [76] W. Gilde, „Eine Möglichkeit der Erhöhung der Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen,“ *Mitteilungen aus dem Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR in Halle (Saale)*, pp. 552-564, 09 1960.
- [77] K. Klöppel und H. Weihermüller, „Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen aus St52,“ *Der Stahlbau*, Bd. 29, Nr. 5, pp. 129-137, 1960.
- [78] T. Gurney, *Fatigue of welded structures*, Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
- [79] R. Olivier und W. Ritter, „Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen Teil 4: Längssteife, Bericht Nr. FB-151 (1982),“ Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS), Düsseldorf, 1982.
- [80] G. Booth, „Constant amplitude fatigue tests on welded steel joints performed in air,“ in *European Offshore Steels Reserach Seminar*, 1978.
- [81] C. M. Branco, S. J. Maddox und C. M. Sonsino, „Fatigue design of welded stainless steel,“ 1998.
- [82] M. Hirt und M. Crisinel, „La résistance à la fatigue des putres en âme pleine compesées - soudées,“ École Plytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 1975.
- [83] J. W. Fisher, P. A. Albrecht, B. T. Yen, D. J. Klingerman und M. McNamee, „Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments,“ 1974.
- [84] O. Puchner, „Augmentation de la résistance à la fatigue par chauffage localisé de plats et de poutres comportant des goussets soudés,“ IIW Dokument XIII-179, 1959.
- [85] F. Mang, Konlak und Ö. Bucak, „Zeit- und Dauerfestigkeit von gewalzten I-Profilen mit angeschweißten Stegauseistungen,“ Abschlußbericht Aif-Nr. 7678; DVS-Nr. 9.112, Karlsruhe, 1992.
- [86] Kuhlmann, U., S. Breunig, T. Ummenhofer und P. Weidner, „Entwicklung einer DAST- Richtlinie für Höherfrequente Hämmerverfahren,“ Abschlußbericht IGF Forschungsvorhaben Nr. 17886, 2018.
- [87] R. Olivier und W. Ritter, „Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen Teil 2: Quersteife, Bericht Nr. FB-151 (1980),“ Deutscher Verband für Schweißtechnik DVS, Düsseldorf, 1980.
-

-
- [88] W. Welz und G. Dennin, „Dauerfestigkeit von Konstruktionen mit aufgeschweißten Bolzen,“ *Scweißen und Schneiden*, Bd. 33, Nr. 2, pp. 63 - 66, 1981.
- [89] W. Fricke und D. Tchuindjang, „Schwingfestigkeitsverhalten von Bolzenschweißungen in der tragenden Schiffskonstruktion,“ Center of Maritime Technologies e.V., 2012.
- [90] W. Flügge und U. Kuhlmann, „Einsatz des Lichtbogenlötens zum Fügen von Anbauteilen an schwingend hoch beanspruchten Stahlkonstruktionen, IGF-No.: 29EWBG,“ FOSTA Abschlussbericht, 2020.
- [91] S. J. Maddox, *The Effect of Plate Thickness on the Fatigue Strength of Fillet Welded Joints*, The Welding Institute, 1987.
- [92] S. J. Maddox, „Status Review on Fatigue Performance of Fillet Welds,“ *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, August 2008.
- [93] S. Kainuma und T. Mori, „A study on fatigue crack initiation point of load-carrying fillet welded cruciform joints,“ *International Journal of Fatigue*, Bd. 30, pp. 1669-1677, 2008.
- [94] DIN EN 1993-2/NA: Nationaler Anhang zu Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken, 2014.
- [95] S. J. Maddox und G. R. Razmjoo, „Interim fatigue design recommendations for fillet welded joints under complex loading,“ *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Bd. 24, pp. 329-337, 2001.
- [96] DIN EN 1994-2: Eurocode 4, Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton - Teil 2: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für Brücken, 2010.
- [97] B. Pereira, A. Claudio, L. Borges, S. Yadav und A. Nussbaumer, „Fatigue behaviour and detailing of slotted tubular connection,“ in *Tubular Structures XV, Proceedings of the 15th International Symposium on Tubular Structures*, Rio de Janeiro, Brazil, 2015.
- [98] U. Kuhlmann und L. Gözl, „Praxisgerechte Gestaltung von Diagonalrohr-Anschlüssen im Stahl- und Verbundbrückenbau. IGF-DASSt Nr. 20452,“ laufendes Projekt bis 2021.
- [99] EN 1090-2: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken, Ausgabedatum: September 2018.
- [100] DIN EN ISO 9606-1, Prüfung von Schweißern - Schmelzschweißen - Teil 1: Stähle, Ausgabedatum: Dezember 2017.
- [101] X.-L. Zhao, S. Herion, J. A. Packer, R. Puhtli, G. Sedlacek, J. Wardenier, K. Weynand, A. M. van Wingerde und N. F. Yeomans, „Design Guide for circular and
-

-
- rectangular hollow section welded joints under fatigue loading," TÜV-Verlag, Köln, 2001.
- [102] M. H. Kolstein, „Fatigue Classification of Welded Joints in Orthotropic Steel Bridge Decks - Dissertation," Structural and Building Engineering Delft University of Technology, Delft, 2007 .
- [103] DIN ENV 1993, „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken," 2001.
- [104] DIN Fachbericht 103, „Stahlbrücken - 1. Auflage," 2002.
- [105] DIN Fachbericht 103, „Stahlbrücken - 2. Ausgabe," 2003.
- [106] DIN-Fachbericht 103, „Stahlbrücken - 3. Ausgabe," 2009.
- [107] M. Euler, „Ermüdungsverhalten nicht durchgeschweißter Konstruktionsdetails mit mehrachsiger Beanspruchung aus Radlasteinleitung - Dissertation, Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf Nr. 2017-01X," Stuttgart, 2017.
- [108] U. Kuhlmann, K.-H. Herter, M. Euler, P. Rettenmeier und S. Weihe, „Versuchsbasierte Ermüdungsfestigkeitswerte der Radlasteinleitung - Untersuchungen an nicht durchgeschweißten Flansch-Steg-Verbindungen," *Stahlbau*, Bd. 84, Nr. 9, pp. 655-666, 2015.
- [109] M. Feldmann und S. Citarelli, „Radlastinduzierte Ermüdung bei Kranbahnträgern schwerer Hüttenkrane," *Stahlbau*, Bd. 87, Nr. 12, pp. 1187-1198, 2018.
- [110] S. Citarelli, „Ermüdungsbewertung durchgeschweißter Obergurt-Stegblechanschlüsse von Kranbahnträgern unter konzentrierter Radlasteinleitung - Dissertation," RWTH Aachen University, Veröffentlichung 2020.
- [111] J. Fisher, *Fatigue and Fracture in Steel Bridges - Case Studies*, New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [112] O. Graf, „Versuche über den Einfluss der Gestalt der Enden von aufgeschweißten Laschen in Zuggliedern und von aufgeschweißten Gurtverstärkungen an Trägern. Bericht des Deutschen Ausschusses für Stahlbau Ausgabe B.," Verlag von Julius Springer, Stuttgart, 1937.
- [113] J. Fisher, K. Frank, M. Hirt und B. McNamee, „Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams," Fritz Engineering Laboratory Report No. 334.2, Lehigh University, Pennsylvania, 1969.
- [114] L. Bergqvist und J. Sperle, „Influence of TIG Dressing on the Fatigue Strength of Coverplated Beams - IIW Doc. No. XIII.826-77," International Institute of Welding, 1977.
- [115] P. Berger, „Investigations on the Fatigue Strength of Welded Joints by Full Scale Tests - IIW Doc. XII-938-80," International Institute of Welding, DDR, 1980.
-

- [116] F. Mang, S. Herion, G. Sedlacek, C. Müller und M. Kästner, „Bemessungsregeln zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Krankonstruktionen - Klassifizierung von kranbauspezifischen Kerbdetails. FOSTA Forschungsbericht P 293,“ Forschungsvereinigung Stahlanwendungen e.V. (FOSTA), Düsseldorf, 2000.
- [117] DS 804: Druckschrift 804: Eisenbahbrücken, Karlsruhe: Druckschriftenwerk der Deutschen Bahn AG, 1980.
- [118] Vorschriften für geschweißte Eisenbahnbrücken, Karlsruhe: Druckschriftenwerk der Deutschen Bahn AG, 1955.
- [119] K. Drebenstedt und A. K. Scholz, „Versuchsbericht der Ermüdungsversuche am Konstruktionsdetail Gurtlamellenende,“ *Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart*, Nr. 2018-57X, p. 750, 2018.
- [120] DVS Merkblatt 0905, Industrielle Anwendung des Kerbspannungskonzepts für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen., DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Q 1.1 Konstruktion und Berechnung, 2017.
- [121] H. Unterweger, A. Taras und M. Puig, „Gurtdickensprünge geschweißter Biegeträger - Bemessungsbehelf für die komplexen lokalen Zusatzbeanspruchungen,“ *Stahlbau*, Bd. 83, Nr. 8, pp. 542 - 552, 2014.
- [122] C. Seeßelberg, „Zum Entwurf von Kranbahnträgern für Laufkrane - Fachthema Kranbahnträger,“ *FRILO-Magazin*, pp. 20 - 30, 2005.
- [123] C. Seeßelberg, „Kranbahnen - Bemessung und konstruktive Gestaltung nach Eurocode - 4. Auflage,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014.
- [124] K. Weynand, R. Oerder und B. Gorgels, „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN EN 1993-1-8,“ Stahlbau Verlag , Düsseldorf, 2018.
- [125] DIN EN 1993-1-8/NA: Eurocode 3, „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen – Deutscher nationaler Anhang,“ 2010.
- [126] C. Petersen, „Stahlbau - Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten - 4. Auflage,“ Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [127] H. Schmidt und M. Neuper, „Zum elastostatischen Tragverhalten exzentrisch gezogener L-Stöße mit vorgespannten Schrauben,“ *Stahlbau*, Bd. 66, Nr. 3, pp. 163 - 168, 1997.
- [128] C. Petersen, „Nachweis der Betriebsfestigkeit exzentrisch beanspruchter Ringflanschverbindungen,“ *Stahlbau*, Bd. 67, Nr. 3, pp. 191 - 203, 1998.
- [129] VDI 2230, „Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen,“ 2015.
- [130] G. Lacher, „Dauerschwingversuche an axialbeanspruchten Schrauben in T-Verbindungen,“ *Stahlbau*, Bd. 56, Nr. 9, pp. 257 - 266, 1987.

- [131] G. Lacher und A. Hedenkamp, „Zeit- und Dauerfestigkeit von hochfesten vorgespannten Schrauben in Stirnplattenstößen, Teil I und Teil II,“ *Stahlbau*, Bd. 62, Nr. 8, pp. 241 - 249, 1993.
- [132] G. Lacher und A. Hedenkamp, „Betriebsfestigkeit von hochfesten vorgespannten Schrauben in Stirnplattenstößen von Kranbahnen,“ *Stahlbau*, Bd. 63, Nr. 11, pp. 343 - 346, 1994.
- [133] D. Lehmann, „Berechnung des nichtlinearen Tragverhaltens gezogener vorgespannter L-Flansche,“ *Stahlbau*, Bd. 69, Nr. 1, pp. 35 - 54, 2000.
- [134] D. Lehmann, „Berechnung von L-Flanschen mit unterschiedlichen Kontaktflächen/Ringflanschformen nach DIN 4133,“ *Stahlbau*, Bd. 69, Nr. 9, pp. 682 - 687, 2000.
- [135] D. Lehmann, „Systematisierung der Flanschberechnungen mit Hilfe von Stabsystemen - Vom elastisch gebetteten Balken zum Ein-Punkt-Modell der VDI 2230,“ *Stahlbau*, Bd. 70, Nr. 2, pp. 85 - 99, 2001.
- [136] M. Seidel und P. Schaumann, „Ermittlung der Ermüdungsbeanspruchung von Schrauben exzentrisch belasteter Flanschverbindungen,“ *Stahlbau*, Bd. 70, Nr. 7, pp. 474 - 486, 2001.
- [137] S. M. Schaumann P., „Ermüdungsbeanspruchung geschraubter Ringflanschverbindungen bei Windenergieanlagen,“ *Stahlbau*, Bd. 71, Nr. 3, pp. 204 - 211, 2002.
- [138] P. Schaumann, P. Kleineidam und S. M., „Zur FE_Modellierung von zugbeanspruchten Schraubenverbindungen,“ *Stahlbau*, Bd. 70, Nr. 2, pp. 73 - 84, 2001.
- [139] P. Schaumann und K. Schwarzer, „Beanspruchung und Schwingfestigkeit der Doppel-HY-Naht mit Doppelkehlnaht von Stirnplattenverbindungen,“ Schlussbericht zum Forschungsvorhaben IV 1-5-637/91 des Instituts für Stahlbau, Universität Hannover, 1999.
- [140] M. Ladinek, R. Lang und G. Lener, „Ermüdungsfestigkeit an Stirnplattenverbindungen - Experimentelle und numerische Untersuchungen,“ *Stahlbau*, Bd. 86, Nr. 9, pp. 765 - 771, 2017.
- [141] DIN EN 10025-2, „Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; Deutsche Fassung EN 10025-2,“ 2004.
- [142] DIN EN 14399-4, „Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau – Teil 4: System HV – Garnituren aus Sechskantschrauben und -muttern; Deutsche Fassung EN 14399-4,“ 2015.

- [143] DIN EN ISO 898-1, „Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl - Teil1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen - Regelgewinde und Feingewinde; Deutsche Fassung EN ISO 898-1,“ 2013.
- [144] DIN EN ISO 10684, „Verbindungselemente - Feuerverzinkung (ISO 10684:2004 + Cor. 1:2008); Deutsche Fassung EN ISO 10684:2004 + AC,“ 2009.
- [145] DASt-Richtlinie 021, „Schraubenverbindungen aus feuerverzinkten Garnituren M39 bis M72 entsprechend DIN EN 14399-4, DIN EN 14399-6,“ Herausgegeben von: Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt, Stahlbau Verlag, 2013.
- [146] DASt-Richtlinie 022, „Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen - Guideline for hot-dip-zinc-Coating of prefabricated loadbearing steel components,“ Herausgegeben von: Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt; Stahlbau Verlag, 2016.
- [147] U. Guerrera, „Commentary to Appendix B of the Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures of the European Convention for Constructional Steelwork,“ 1986, unpublished.
- [148] J. Fisher, „Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments,“ National Cooperative Highway Research Program Report 147, 19, 1974.
- [149] prEN 1993-1-9:2020, „Second Draft of Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1.9: Fatigue,“ 2019.
- [150] CIDECT 7AB , „Fatigue behaviour of hollow sections joints and high strength steel,“ 2019 (in Bearbeitung).
- [151] U. Kuhlmann, A. Dürr, R. Steinhausen, S. Bove, J. Roth und C. Pientschke, „FOSTA P1163: Wirtschaftliche Auslegung von ermüdungsbeanspruchten geschweißten Rundhohlprofilknoten unter Berücksichtigung der erforderlichen Schweißnahtqualität,“ 2019 (in Bearbeitung).
- [152] D. Radaj, Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen; Ermüdungsfestigkeit, Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH, 1985.

20 Quellenverzeichnis

List of sources

Zuordnung der mit # gekennzeichneten Literaturverweise:

- 1 Krause H.J., Preß H., Schönherr W.; Dauerfestigkeitsversuche mit brenngeschnittenen Proben aus St 52; Schweißen und Schneiden; 26; Heft 10; 381-384; 1974
- 2 N.N.; The properties of flame cut edges; Netherlands Institute of Welding, Working Group 1913; NL; Final Report; 1973
- 3 Goldberg F.; The influence of thermal cutting and its quality on the fatigue strength of steel St 52-3; IIW-Document; XIII-654-72
- 4 Goldberg F.; The effect of residual stress and quality of the thermal cutting edges of the fatigue and static strength of steel; Australian Welding Journal; 127-134; 1974
- 5 Schlebeck E., Bölter H.; Brennschneiden von St 52-3; ZIS-Mitteilungen; 6; 1; 13-29; 1964
- 6 Matting A., Wolf H., Steffens H.-D.; Dauerfestigkeit brenngeschnittener und schweißtechnisch ausgebesserter Stahlproben; Schweißen und Schneiden; 11; Heft 1; 8-16; 1959
- 7 Valtinat G., Huhn H.; Betriebsfestigkeit von stählernen Lochstäben und Schraubenverbindungen mit feuerverzinkten Bauteilen und gestanzten Löchern; Forschungsvorhaben; GAV-Nr. FD 23; AiF-Nr. 11097/N1; 2000
- 8 Lieurade H.P.; Etude de la tenue à la fatigue des assemblages boulonnés en aciers à haute limite d'élasticité; IRSID, Report; 339; 1976
- 9 Mas E., Janss J.; Assemblages par boulons à haute résistance – Fatigue des assemblages à double couvre-joint; CRIF, MT 10; 1964
- 10 Research Committee on Steel Bridges for Honshu-Shikoku; Fatigue Design for the Honshu-Shikoku-Bridges; Civil Engineering Institute of Honshu-Shikoku; Tome Annex 2; 1974
- 11 Mang F., Bucak Ö., Klingler J.; Dauerschwingfestigkeitsuntersuchungen an Probekörpern mit brenngeschnittenen Löchern; Schweißen und Schneiden; 1986
- 12 Japanese Society Of Steel Construction (JSSC); Fatigue Design Recommendations for Steel Structures; 1995
- 13 Fatigue Tests On Steel Bolts; Offshore Technology Report OTO; 97.067; 1998
- 14 Kuperus A.; Fatigue Tests on Tensile Loaded High Strength Bolts and Studbolts; Stevin Laboratory, Delft University of Technology; NL; Doc. ECCS; X 71-17;
- 15 Bouwman L.P.; Fatigue of Bolted Connections and Bolts Loaded in Tension; Stevin Laboratory, Delft University of Technology; NL; Report; 6-79-9; 1979
- 16 Lacher G.; Zeit- und Dauerfestigkeit von schwarzen und feuerverzinkten hochfesten Schrauben M20 der Festigkeitsklasse 10.9 unter axialer Beanspruchung; Bauingenieur; 61; 227 - 233; 1986
- 17 Fisher F.L., Frank K.H.; Axial Tension Fatigue Strength of Anchor Bolt; Center for Highway Research, University of Texas; USA; Research Report; 177-1; 1977

-
- 18 Gurney T.R., Maddox S.J.; A Re-Analysis of Fatigue Data for Welded Joints in Steel; The Welding Institute (TWI); Cambridge Research Report; E/44/72; 1972
 - 19 Reemsnyder H.S.; A new specimen for fatigue testing longitudinal fillet weldments; Pro. ASTM; 65; 729-735; 1965
 - 20 Reemsnyder H.S.; Fatigue strength of longitudinal fillet weldments in constructional alloy steel; Welding research supplement; 30; 10; 458-465; 1965
 - 21 Reemsnyder H.S.; Some significant parameters in the fatigue properties of weld joints; Welding research supplement; 34; 5; 213-217; 1969
 - 22 Oliver R., Ritter W.; Einfluß von Poren aus Fertigungsbeschichtungen auf die Schwingfestigkeit längsbeanspruchter Kehlnähte; Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF); DE; Bericht; FB-160; 1981
 - 23 Oliver R., Ritter W.; Schweißen und Schneiden; 35; 7; 308-312; 1983
 - 25 Gurney T.R.; Investigation into the fatigue strength of welded beams Part II: High tensile steel beams without stiffeners; British Welding Journal; 9; 446-454; 1962
 - 26 Harrison J.D.; Exploratory fatigue tests of two girders with corrugated webs; British Welding Journal; 12; 121-125; 1965
 - 27 Fielding D.J.; Fatigue tests of slender-weld hybrid plate girders under combined bending and shear; University of Texas; USA; M.S. Thesis; 1968
 - 28 Fisher J.W., Frank K.H., Hirt M.A., Mc Namee B.M.; Effect of weldments on the fatigue of steel beams; National Cooperative Highway Research Program, Report; 102; 1970
 - 29 Fisher J.W., Albrecht P.A., Yen B.T., Klingerman D.J., Mc Namee B.M.; Fatigue strength of steel beams with welded stiffeners and attachments; National Cooperative Highway Research Program, Report; 147; 1974
 - 30 Fisher J.W., Albrecht P.A., Yen B.T., Klingerman D.J., Mc Namee B.M.; Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams transverse stiffeners attachments; Lehigh University; USA; Fritz Engineering Laboratory Report; 334.10; 1972
 - 31 Albrecht P.A.; Fatigue strength of welded beams with stiffeners; Lehigh University; USA; Ph. D. Dissertation; 1972
 - 32 Hirt M.A.; Fatigue behaviour of rolled and welded beams; Lehigh University; USA; Ph. D. Dissertation; 1971
 - 33 Stallmeyer J.E., Munse W. H.; Behaviour of welded build up beams under repeated flexural loads; Department of Civil Engineering, University of Illinois; USA; Contract; CPR 11-7768; 1966
 - 34 Kouba N.G., Stallmeyer J.E.; The behaviour of stiffened beams under repeated loads; University of Illinois; USA; Struct. Res. Series; 173; 1959
 - 35 Neumann A., Müller G.; Schwingfestigkeitsversuche an geschweißten Biegeträgern aus Stahl St 37 mit unterbrochener Halsnaht; ZIS; III; 1957
 - 36 Munse W.H., Stallmeyer J.E.; Influence of weld details on fatigue of welded beams and girders; British Welding Journal; 7; 3; 188-200; 1960
 - 37 Ruge J., Woesle H.; Ergebnisse von Dauerfestigkeitsuntersuchungen; Fachbuchreihe Schweißtechnik; 23; 59-68; 1962
-

-
- 38 Lew H.S., Toprac A.A.; Fatigue tests of welded hybrid plate girders under constant moment; Center for Highway Research, The University of Texas; USA; Research Report; 77-2 F; 1967
 - 39 Olivier R.; Untersuchungen zur Dauerschwingfestigkeit des Stahles St 52-3 an geschweißten I-Trägern; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Bericht; FB-91; 1978
 - 40 Minner H.H; Schwingfestigkeitserhöhung von Schweißverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen STE 460 und STE 690 durch Einsatz des WIG-Nachbehandlungsverfahren; TH Darmstadt; DE; Dissertation; 1981
 - 41 Ohwa T.; Fatigue strength of welded-joints for steel pipe; Kobe Steel Engineering Reports; 15-3; 1965
 - 42 Kurobane Y., Makino Y., Sagawa M.; Low cycle fatigue research on tubular K-joints; IIW Document; XV-291-70; 1970
 - 43 Zirn R.; Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Rohrknötchenpunkte und Rohrflanschenverbindungen; MPA Stuttgart; DE; Techn.-Wiss. Bericht; Heft 75-01; 1975
 - 44 Kurobane Y., Konomi M.; Fatigue strength of tubular K-joints; S-N relationships proposed as tentative design criteria; IIW Document; XV-340-73; 1973
 - 45 Mitsui Y., Kurobane Y., Makino Y.; Fatigue behavior of tubular K-joints subjected to variable load ranges; Kyushu branch of AIJ; JP; Research report; 24; 1979
 - 46 Mitsui Y., Kurobane Y., Nishimura M.; Fatigue resistance of stiffened tubular joints; IIW International Conference on Welding of tubular structures; 1984
 - 47 Mang F.; Fatigue Behavior of Rectangular Hollow Section Joints Made of High-Strength Steels; TH Karlsruhe; DE; Final Report of Project; 7210-SA/116; 1995/1997
 - 48 Noordhoek C., Wardenier J., Dutta D.; The fatigue behaviour of welded joints in square hollow sections Part 1: Test results and S-N curves; ECSC-Convention; 6210-KD111103
 - 49 Central Research Laboratories; Sumitomo Metal Industries, Ltd; 1974
 - 50 Kawahara M., Iwasaki T., Asano K.; Fatigue crack growth behavior in welded tubular joints in T, TY and K; Proc. OTC; 3423; 1979
 - 51 Ohtake F., Sakamoto S., Nakazato T., Minoshima T.; Fatigue strength of overlapping tubular N-joints CIDECT Program 7B-80-16; Proc. OTC; 3964; 1981
 - 52 Akiyama N., Yajima M., Akiyama H., Ohtake F.; Experimental study on strength in steel tubular structures; JSSC; 10-102; 1974
 - 53 Nakajima T., Kurokawa K., Koshihara T.; Experimental study on the fatigue strength of thin-wall- welded tubular joints (1st report); Summary papers, Annual Conference of AIJ; 1973
 - 54 Ohtake F., Sakamoto S., Tanaka T., Kai T., Nakazato T., Takigawa T.; Static and fatigue strength of high tensile strength steel tubular joints for offshore structures; Proc. OTC; 3254; 1978
 - 55 Thonnard J., Janss J.; Comportement en Fatigue des Dallas Orthotropes avec Raidisseurs Trapézoidaux; CRIF-WTCM, Section Construction Métallique, MT; 161; 1985
-

-
- 56 Maddox S.J.; The Fatigue Behaviour of Trapezoidal Stiffener to Deck Plate Welds in Orthotropic Bridge Decks; Transport and Road Research Laboratory; UK; 1974
- 57 Ouchida H., Nishioka A.; A study of fatigue strength of fillet welded joints; Hitachi Research Laboratory; JP; IIW-Document; XIII-338-64; IIW; 1964
- 58 Haibach E.; Schwingfestigkeits-Untersuchung an Kreuzstößen mit K-Naht aus dem Grundwerkstoff Stahl St 37; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Bericht; FB-90; Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung d. Angewandten Forschung e. V.; 1970
- 59 Takahashi K., Ito A., Ishida M., Matoba M.; Fatigue strength of obliquely crossed fillet welded joint; Nippon Steel Corp.; Mitsubishi Heavy Industries LTD.; JP; IIW-Document; XIII-570-70; IIW; 1970
- 60 Peckover R.S., Fraser R.A.W., Crisp H.G., Long D., Chadwick E.A., Thorpe T.W.; United Kingdom Offshore Steels Research Project - Phase 1; Department of Energy; UK; Offshore Technology Report; OTH 88 282; Her Majesty's Stationery Office; 1988
- 61 Klöppel K., Weihermüller H.; Neue Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen aus Stahl St 52; Ingenieur-Laboratorium, Technische Hochschule; DE; Der Stahlbau; 26; 6; 149-155; Ernst & Sohn; 1957
- 62 Hartmann A. J., Munse W. H.; Fatigue behaviour of welded joints and weldments in HY-80 steel subjected to axial loadings; Department of Civil Engineering; USA; Structural Research Series (SRS); 250; 1962
- 63 Yamaguchi I., Terada Y., Nitta A.; On the fatigue strength of steels for ship structures; Nippon Kaiji Kyokai; JP; IIW-Document; XIII-425-66; IIW; 1966
- 64 Donato L.F., Guerrera U., Sanpaolesi L., Bertero M.; Sugli acciai tipo T1 e relativi giunti saldati; Centro Studi Costruzioni Metalliche, Dell'Università Di Pisa; IT; Pubblicazione; 72; Italsider; 1972
- 65 Iida K.; Tests in progress on corrosion fatigue of welded joints and structures; Department of Naval Architecture, University of Tokyo; JP; IIW-Document; XIII-662-72; IIW; 1972
- 66 Haibach E., Olivier R.; Schwingfestigkeits-Untersuchung an Kreuzstößen mit K-Naht aus dem Grundwerkstoff Stahl St 52; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Bericht; FB-120; 1975
- 67 Haibach E., Olivier R.; Schwingfestigkeits-Untersuchung an Kreuzstößen mit K-Naht aus dem Grundwerkstoff Stahl St 52; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Archiv für das Eisenhüttenwesen; 47; 3; 181-186; 1976
- 68 N.N.; Etude du comportement en fatigue classique de joints types soudés qualité industrielle; Europe; steel research reports; EUR 5266 f; Commission of the European Communities - European Coal and Steel Community; 1975
- 69 Shimada W., Hoshinouchi S., Hijikata A., Yosioka S., Inoue A.; Improvement of fatigue strength in fillet welded joint by CO₂ soft plasma arc overlaying on weld toe; Manufacturing Development Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation; Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation; JP; IIW-Document, Interim Report; XIII-830-77; IIW; 1977
- 70 Wildschut H., de Back J., Dortland W., van Leeuwen J.L.; Fatigue behaviour of welded joints in air and sea water; Stevin Laboratory, University of Technology; Metal Research Institute TNO; NL; European Offshore Steels Research Seminar,
-

-
- Cambridge, UK, 27-29 November 1978; Session III; P5; 1-22; The Welding Institute (TWI); 1978
- 71 Booth G.S.; Constant amplitude fatigue tests on welded steel joints performed in sea water; The Welding Institute (TWI); UK; European Offshore Steels Research Seminar, Cambridge, UK, 27-29 November 1978; Session IV; P9; 1-14; The Welding Institute (TWI); 1978
- 72 Minner H.H., Seeger T.; Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Schweißverbindungen mit Stumpfnahht und K-Nahht Sondergüte aus Stranggußmaterial St 52-3; Fachgebiet Werkstoffmechanik, Technische Universität; DE; Forschungsbericht; FI-3; 1980
- 73 Booth G.S.; Constant Amplitude Fatigue Tests on Welded Steel Joints Performed in Air; The Welding Institute (TWI); UK; European Offshore Steels Research Seminar, Cambridge, UK, 27-29 November 1978; Session III; P4; 1-15; The Welding Institute (TWI); 1978
- 75 Sedlacek G., Hoffmeister B., Trumpf H., et.al; Composite Bridge Design for Small and Medium Spans; seven different institutes; Europe; technical steel research reports; EUR 20583 EN; Luxembourg Office for Official Publications of the European Communities; 2003
- 76 Fatigue Design for the Honshu-Shikoku Bridges; Civil Engineering Institute of Honshu-Shikoku;
- 77 Fisher J.W., Frank K.H., Hirt M. A., McNamee B.M.; Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams; Lehigh University; USA; National Cooperative Highway Research Programm; 102; Highway Research Board; 1970
- 79 Hirt M.A., Crisinel M.; La résistance à la fatigue des poutres en âme pleine composées-soudées : effet des plaquettes et goussets soudés à l'aile; Laboratoire de la construction métallique (ICOM), École polytechnique fédérale de Lausanne; Switzerland; Rapport d'essais; 017; 1975
- 80 Kawahara M., Iwasaki T., Kokan K.; Analysis of fatigue crack growth behavior in welded tubular T-joints; Proceedings of the Tenth Annual Offshore Technology Conference; 3; OTC 3251; 1719-1728; American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers; 1978
- 81 Maddox S.J., Branco C.M., Sonsino C.M., Mantegi S., Kueppers M., Infante V.; Fatigue Design Data for Welded Stainless Steels; The Welding Institute (TWI); ID-MEC; Fraunhofer Institute for Structural Durability (LBF); UK; Portugal; DE; IIW-Document; XIII-1768-99; 35; IIW; 1999
- 82 Maeda T., Uchino K., Sakurai H.; Experimental study on the fatigue strength of welded tubular T- and X-joints; Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., LTD; JP; IIW-Document; XV-270-69; IIW; 1969
- 83 Mitsui Y., Kurobane Y.; Evaluation of bending fatigue life for fillet welded joints and application to fatigue analysis of tubular joints; Kumamoto University; JP; IIW-Document; XV-540-83; IIW; 1983
- 85 Schilling C. G., Klipstein K. H., Barsom J. M., Blake G.T.; Fatigue of Welded Steel Bridge Members Under Variable Amplitude Loadings; National Academy of Sciences; USA; National Cooperative Highway Research Programm (NCHRP) - Report; 188; Transportation Research Board; 1978
-

-
- 86 Seeger T., Olivier R.; Ertragbare und zulässige Schubspannungen schwingbeanspruchter Schweissverbindungen; Institut für Stahlbau und Werkstoffkunde; DE; Der Stahlbau; 56; 8; 231-238; Ernst & Sohn; 1987
- 87 The Japan Ship Machinery Development Association; Study reports on fatigue strength of pipe connections for offshore structures (1977)
- 88 Uchino K., Matsui A.; Experimental study on the fatigue strength of welded tube to gusset-joints; JP; IIW-Document; XIII-726-74; IIW; 1974
- 89 Washio K., Mitsui Y., Nishida Y., Tanaka T., Hisamitsu N., Hozumi S.; Study of flat cutting method for end preparation of tube in fabrication of tubular structures; Architectural Institute of Japan (AIJ); JP; Transactions of the Architectural Institute of Japan; 154; 9-16; 1968
- 90 Yamasaki T., Takizawa S., Komatsu M.; Static and fatigue tests on large-size tubular T-joints; Proceedings of the Eleventh Annual Offshore Technology Conference; 1; OTC 3424; 583-591; American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers; 1979
- 91 Baxter D.E., Modlen G.F.; Some factors affecting the fatigue strength of fillet welds; British Welding Journal; 13; 4; 184-188; 92; Benoit D., Lieurade H.-P., Truchon M.; Application of fracture mechanics to the calculation of behaviour of welded structures in fatigue under various load conditions; Institut de Recherches de la Sidérurgie Francaise; FR; European Offshore Steels Research Seminar, Cambridge, UK, 27-29 November 1978; Session VII; P21; 1-11; TWI; 1978
- 93 Bierett G.; Über die Betriebsfestigkeit von geschweißten und genieteten Stahlverbindungen; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Stahl und Eisen; 87; 24; 1465-1472; VDEh; 1967
- 94 Bierett G.; Einige wichtige Gesetze der Betriebsfestigkeit geschweißter Bauteile aus Stahl; Schweißen und Schneiden; 24; 11; 429-434; DVS Media GmbH; 1972
- 95 Brine F.E., Webber D., Baron H.G.; Effect of shot peening on the fatigue properties of maraging steel and Al-Zn-Mg alloy; British Welding Journal; 15; 11; 541-546; 1968
- 96 Caracostea A., Ghimes V., Salageanu H.; Ermüdungsversuche an Schweiß- und Nietverbindungen für Stahlbrücken
- 97 Contaretti A., Rinaldi F.; Il problema della valutazione del comportamento in opera di giunzioni saldate sollecitate a fatica Memoria presentata al XVII Convegno Nazionale AIM
- 98 Frank K.H.; The fatigue strength of fillet welded connections; Fritz Engineering Laboratory, Lehigh University; USA; Ph. D. Dissertation; 358.37; Lehigh University; 1971
- 99 Friis L.E., Sperle J.O., Wallin L.E.; Fatigue of welded structures - some Swedish results during recent years; The Welding Institute (TWI); UK; Proceedings of the conference on fatigue of welded structures, 6-9 July 1970; 1; Session 1+2; 114-134; 1971
- 100 Haibach E.; Abhängigkeit der ertragbaren Spannungen schwingbeanspruchter Schweißverbindungen vom Beanspruchungskollektiv; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Bericht; FB-79; 1968
-

-
- 101 Haibach E.; Schwingfestigkeit hochfester Feinkornbaustähle im geschweißten Zustand; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Schweißen und Schneiden; 27; 5; 179-181; DVS Media GmbH; 1975
 - 102 Haibach E.; Fatigue investigation of typical welded joints in steel Fe E 460 as compared to Fe E 355; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Bericht; FB-147; 1979
 - 103 Haibach E., Hempel M.; Ertragbare Spannungen für zwei typische Schweißverbindungen aus Stahl St 37 und Stahl St 52 bei hohen Werten des Spannungsverhältnisses und bei verschiedenen Nahtausführungen; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; Max-Planck-Institut für Eisenbahnforschung; DE
 - 104 Haibach E., Olivier R.; Fatigue Investigation of Higher Strength Structural Steels in Notched and in Welded Condition: Synthesis of results and tentative conclusions; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Report; TB-114; Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung d. Angewandten Forschung e. V.; 1974
 - 105 Haibach E., Olivier R.; Systematische Schwingfestigkeitsuntersuchungen an hochfesten Feinkornbaustählen in geschweißtem Zustand
 - 106 Haibach E., Olivier R.; Streuanalysen der Ergebnisse aus systematischen Schwingfestigkeitsuntersuchungen mit Schweißverbindungen aus Feinkornbaustahl; Materialprüfung - MP materials testing; 17; 11; 399-401; Hanser, München; 1975
 - 107 Haibach E., Ostermann H., Rückert H.; Betriebsfestigkeit von Schweißverbindungen aus Baustahl unter einer Zufallsfolge der Belastung; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Schweißen und Schneiden; 32; 3; 93-98; DVS Media GmbH; 1980
 - 108 Klöppel K., Seeger T., Nowak B.; Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Schädigungsverhalten dauerbeanspruchter geschweißter Kreuzstöße aus St 37; Institut für Statik und Stahlbau; DE; Veröffentlichungen des Instituts für Statik und Stahlbau der Technischen Hochschule Darmstadt; Heft 5; 1969
 - 109 Latzin K., Petersen Chr.; Untersuchungsergebnisse für die Stahlbaupraxis; Institut für Stahlbau, Technische Universität; DE; DVS-Berichte; 31; 19-25; DVS Media GmbH; 1974
 - 110 Lieurade H. -P.; Etude du comportement en fatigue à programme d'assemblages soudés en croix en acier E 24 et E 36 (E355); Institut de Recherches de la Sidérurgie Française (IRSID); FR; IIW-Document; XIII-769-75; 37; IIW; 1975
 - 111 Lieurade H. -P., Haibach E.; Etude en fatigue oligocyclique de la tenue d'assemblages soudés en croix en aciers à haute limite d'élasticité; Institut de Recherches de la Sidérurgie Française (IRSID); Laboratorium für Betriebsfestigkeit; FR; DE; Revue de Métallurgie; 75; 3; 177-191; Societe française de metallurgie; 1978
 - 112 Lieurade H. -P., Rabbe P.; Caractéristiques de fatigue d'assemblages soudés en acier à haute limite d'élasticité; Institut de Recherches de la Sidérurgie Française (IRSID); Creusot-Loire; FR; Revue de Métallurgie; 73; 4; 333-358; Societe française de metallurgie; 1976
 - 113 Macfarlane D.S., Harrison J.D.; Some fatigue tests of load-carrying transverse fillet welds; British Welding Research Association; UK; British Welding Journal; 12; 613-623; 1965
-

-
- 114 Mryka J.; Die Dauerfestigkeit UP-geschweißter Verbindungen nach Versuchen des Institus Spawalnictwa in Gliwice; Institut Spawalnictwa; PL; Schweißtechnik (Zeitschrift für alle Gebiete der Schweiß-, Schneid- und Löttechnik); 1958; 2; 53-54; Verlag Technik, Ost-Berlin; 1958
- 115 Nieth F., Wiegand H.; Das Verhalten von Baustählen höherer Festigkeit nach dem Feuerverzinken bei dynamischer Beanspruchung; Archiv für das Eisenhüttenwesen; 46; 9; 589-593; 1975
- 116 Branco C.M., Maddox S.J., Sonsino C.M.; Fatigue design of welded stainless steels; Instituto Superior Tecnico; TWI Limited; Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit LBF; Portugal; UK; DE; technical steel research reports; EUR 19972 EN; Luxembourg Office for Official Publications of the European Communities; 2001
- 117 N.N.; Fatigue investigation for higher strength structural steels in notched and in welded condition; six different laboratories; Europe; steel research reports; EUR 5357 e; Commission of the European Communities - European Coal and Steel Community; 1975
- 118 Neumann A.; Theorie der Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen; Schweißtechnik (Zeitschrift für alle Gebiete der Schweiß-, Schneid- und Löttechnik); 1958; 2; 423-431; VEB Verlag Technik Ost-Berlin; 1958
- 119 Neumann A.; Versuche im KBS, IV/1957; Kommunale Berufsschule (KBS); Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR (ZIS); GDR; Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen; 191-199; VEB Verlag Technik Ost-Berlin; 1960
- 120 Neumann A., Müller G.; Versuche in Zusammenarbeit mit Institut für Fördertechnik IV/1957; Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR (ZIS); Institut für Fördertechnik; GDR; Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen; 204-207; VEB Verlag Technik Ost-Berlin; 1960
- 121 Olivier R., Ritter W.; Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Schweißverbindungen in Stahl 15 Mo 3
- 122 Olivier R., Ritter W.; Schwingfestigkeitsversuche an Elektroschlacke-Schweißverbindungen
- 123 Otto J., Boehme D.; Einfluß von Fertigungsbeschichtungsporen auf die Schwingfestigkeit querbeanspruchter Kehlnähte - Versuchsergebnisse; DE; Schweißen und Schneiden; 31; 4; 141-143; DVS Media GmbH; 1979
- 124 Sedlacek G., Puthli R., Hanswille G., Schleich J.-B., Galea Y., Hegger J.; Use of high-strength steel S460 - chapter 9.2: fatigue of shear studs d=25mm; Lehrstuhl für Stahlbau; Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine; Fachgebiet für Stahl- und Verbundbau; and more; DE; FR; LU; technical steel research reports; EUR 20104 EN; 291-300; Luxembourg Office for Official Publications of the European Communities; 2002
- 125 Ouchida H., Nishioka A.; Dauerfestigkeit von Kehlnähten; JP; Schweißtechnik (Zeitschrift für alle Gebiete der Schweiß-, Schneid- und Löttechnik); 16; 4; 150-157; Verlag Technik, Ost-Berlin; 1966
- 126 Petersen Ch.; Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen nach Überschweißung der Feuerverzinkung; DE; Der Stahlbau; 46; 9; 277-282; Ernst & Sohn; 1977
- 127 Robakowski T.; Gliwice, III/1957; Institut für Schweißtechnik Gliwice; Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR (ZIS); PL, DE; Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen; 199-204; VEB Verlag Technik Ost-Berlin; 1960
-

-
- 128 Robakowski T.; Dauerfestigkeit und mechanische Eigenschaften UP-geschweißter Verbindungen des Stahles 14 HNMB Cu; Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR (ZIS); DE; ZIS-Mitteilungen; 15-9; 2; 995-1005; 1973
- 129 Buxbaum O., Ostermann H., Rueckert H.; Schwingfestigkeit von Schweissverbindungen unter einer Zufallsfolge von Belastungen; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Schlussbericht; AIF 3338; 1978
- 130 Simon P., Bragard A.; Fatigue strength of structural steel welded joints and its improvement; Centre de Recherches Métallurgiques (C. R. M.); BE; International Symposium "Integrity of Offshore Structures"; 9; 1-25; Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland; 1978
- 131 Mesinger M.; Zum Ermüdungsverhalten von Kopfbolzendübeln im Verbundbau - Kapitel 2.4: Eigene Pus-Out-Versuche mit Vollbeton-Platten; Fachgebiet Stahlbau, Technische Universität; DE; Dissertation; 68-89; Wissenschaftsverlag Mainz, Aachen; 2000
- 132 Usami S., Kusumoto S.; Fatigue strength at roots of cruciform, tee and lap joints; Hitachi Research Laboratory; JP; IIW-Document; XIII-833-77; IIW; 1977
- 133 Webber D.; The comparison of the fatigue strength of welded joints in structural steel made at Sheffield University and Military Engineering
- 134 White D.J., Lewszuk J.; Cumulative damage in push-pull fatigue of fillet-welded mild steel plate subjected to narrow and random loading; The Institution of Mechanical Engineers; UK; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; 185; 28; 339-351; 1970-1971
- 135 Yamaguchi J.; The fatigue strength of fillet welded cross joint; Nippon Kaiji Kyokai; JP; IIW-Document; XIII-623-71; IIW; 1971
- 136 Razmjoo G.R.; Design Guidance on Fatigue of Welded Stainless Steel Joints; TWI The Welding Institut; UK; Material Engineering; III; ASME; 1995
- 137 Fisher J.W., Mertz D.R., Zhong A.; Steel Bridge Members Under Variable Amplitude Long Life Fatigue; Fritz Engineering Laboratory; USA; Fritz Engineering Laboratory Report; 463-1; 83; 85; 1983
- 138 Tajima, Itoh, Shima, Funakoshi, Ishiwata; Application of 80 kp/mm² class high tensile strength steel to railway bridge; IIW-Document; XIII-706-73; IIW
- 139 Mang E., Bucak Ö.; Untersuchungen an Verbindungen von geschlossenen und offenen Profilen aus hochfesten Stählen; Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V.; DE; Veröffentlichungen der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V.; P11; Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V.; 1982
- 140 Gilde W., Müller G., Schwarz H.; Eine Möglichkeit der Erhöhung der Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen; Zentralinstitut für Schweißtechnik der Deutschen Demokratischen Republik; DE; ZIS-Mitteilungen; 09/60; 2. Jahrgang; 552-564; Zentralinstitut für Schweißtechnik der Deutschen Demokratischen Republik; 1960
- 141 Hirt M.A., Crisinel M.; La resistance a la fatigue des pontres en ame pleine composees-soudees, Effect des plaquettes et goussets soudes a l' aile; Ecole Polytechnique Federale De Lausanne Departement de Gemi Civil, Institut De La Construction Metallique; Switzerland; ICOM; 017; 37; ICOM (Institut de la construction metallique); 1975
-

-
- 142 Neumann A., Müller G.; ZIS, IV/1957, veröffentlicht in: Neumann A., Probleme der Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen, VEB Verlag Technik, Berlin, 1966; Zentralinstitut für Schweißtechnik der Deutschen Demokratischen Republik; DE; VEB Verlag Technik Ost-Berlin; 1966
- 143 Gurney T.R.; Fatigue strength of beam with stiffeners welded to the tension flange; UK; British Welding Journal; 7; 9; 569-577; British Welding Research Association; 1960
- 144 Ostermann H.; Einfluß einer Entspannungsbehandlung auf die Zeitfestigkeit von geschweißtem Panzerstahl XH 113; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Bericht des Laboratoriums für Betriebsfestigkeit; Bericht Nr. 2670; not published; 1972
- 145 COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES (ED.); ETUDE DU COMPORTEMENT EN FATIGUE CLASSIQUE DE JOINTS TYPES SOUDÉS DE QUALITÉ INDUSTRIELLE; Centre de RECHERCHES DE L'INDUSTRIE DES FABRICATIONS MÉTALLIQUES; BE; Rapport finale; 6210-45/2/022; 92; COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES; 1975
- 146 Jamada K., Makino T., Baba C., Kikuchi Y.; Fatigue analysis based on crack growth from toe of gusset end weld; Japan Society of Chemical Engineers; JP; Proceedings of ISCE; 303; JSCE; 1980
- 147 Weck R.; Results of fatigue tests on mild steel specimens with welded attachments, IIW-Document No. XIII-154, 1958; UK; IIW-Document; XII-154-58; 3; IIW; 1958
- 148 Gurney T.R.; Influence of residual stresses on fatigue strength of plates with fillet welded attachments; UK; British Welding Journal; 7; 6; 415-430; British Welding Research Association; 1960
- 149 Gurney T.R.; Fatigue tests on butt and fillet welded joints in mild and high tensile structural steels, British Welding Journal 9; UK; British Welding Journal; 9; 11; 614-620; British Welding Research Association; 1962
- 150 Gurney T.R.; Some fatigue tests on fillet welded mild and high tensile steel specimens in the as-welded and normalized conditions; UK; British Welding Journal; 13; 11; 648-651; British Welding Research Association; 1966
- 151 Gurney T.R.; Effect of peening and grinding on the fatigue strength of fillet welded joints; UK; British Welding Journal; 15; 12; 601-609; British Welding Research Association; 1967
- 152 Gurney T.R.; Influence of residual stresses and of mean stress on the fatigue strength of specimens with longitudinal non-load-carrying fillet welds; UK; Journal of Mechanical Engineering Science; 12; 6; 381-390; 1970
- 153 Gurney T.R.; Influence of elapsed time on fatigue strength of welded joints; UK; Metal Construction and British Welding Journal; 1; 6; 294-295; The Welding Institute (TWI); 1969
- 154 Maddox S.J.; A fracture mechanics analysis of the fatigue behaviour of a fillet welded joint; IIW-Document; XIII-722-74; IIW; 1974
- 155 Mathers E., Jupp J.E.M.; The fatigue of stainless steel fillet welds at low temperatures; IIW-Document; XIII-743-74; IIW; 1974
- 156 Knight J.W.; Some basic fatigue data for various types of fillet welded joints in structural steel; TWI The Welding Institut; Welding Research International; 9; 3; 22-41; 1979
-

-
- 157 Tilly G.P., Nunn D.E.; Variable amplitude fatigue in relation to highway bridges; Transport and Road Research Laboratory; UK; Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers; 194; 27; Institution of Mechanical Engineers; 1980
- 158 Sperle J.O.; Fatigue strength of welded joints under variable amplitude loading; IIW-Document; XIII-963-80; IIW; 1980
- 159 Berge S.; Residual stress and stress interaction in fatigue testing of welded joints; The University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology; NO; Report; SK/R 55; 1981
- 160 Berger P.; Ermüdungsversuche an geschweißten Biegeträgern; VEB Metalleichbaukombinat; GDR; IABSE report; 37; 1982
- 161 Niemi E.; Designer's Guide for Hot Spot Fatigue Analysis; IIW-Document; XIII-1819-00; IIW; 2000
- 162 Puchner O.; Augmentation de la résistance à la fatigue par chauffage localisé de plats et de poutres comportant des goussets soudés; IIW-Document; XIII-179; IIW; 1959
- 163 Gurney T.R.; Influence of local heating on fatigue behaviour of welded specimens; UK; British Welding Journal; 6; 10; 491-497; British Welding Research Association; 1959
- 164 Gurney T.R.; Further fatigue tests on mild steel specimens with artificially induced residual stresses; UK; British Welding Journal; 9; 11; 609-613; British Welding Research Association; 1962
- 165 Krämer W.; Betriebsfestigkeitsversuche an Schweißverbindungen mit Lastkollektiven für Straßenbrücken; Versuchs- und Entwicklungsstelle des Straßenwesens, Abteilung Berlin, Fachgruppe Massiv- und Stahlbrücken; DE; Schweißtechnik (Zeitschrift für alle Gebiete der Schweiß-, Schneid- und Löttechnik); 17; 11; 511-514; 1967
- 166 Haibach E.; Betriebsfestigkeitsversuche über den Einfluß der Kollektivform auf die Lebensdauer von geschweißten Stäben mittlerer Kerbwirkung aus Stahl St 37 (unveröffentlicht); Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Bericht des Laboratoriums für Betriebsfestigkeit; 1925 (25017); not published
- 167 Bierett G.; Einige wichtige Gesetze der Betriebsfestigkeit geschweißter Bauteile aus Stahl; Schweißen und Schneiden; 32; 3; 1972
- 168 Berger P.; Der neue Ermüdungsfestigkeitsnachweis in TG 2 13 500, INFORMATIONEN des VEB MLK, Leipzig 18 2, S. 2-8, 1979; VEB Metalleichbaukombinat; DE; INFORMATIONEN des VEB MLK; 18; 2; 2-8; 1979
- 169 Müller G.; Ein Beitrag zur Betriebsfestigkeit geschweißter Konstruktionen; ZIS-Mitteilungen; 10; 68; 1640-1651; 1968
- 170 Berger P.; Investigation on the Fatigue Strength of Welded Joints by Full Scale Tests; GDR; IIW-Document; XIII-983-80; IIW; 1980
- 171 Klippstein K.H., Schilling C.G.; Pilot Study on the Constant and Variable Amplitude Behavior of Transverse Stiffener Welds; Journal of Constructional Steel Research; 12; 229-252; 1989
-

-
- 172 Albrecht P., Friedland I.M.; Fatigue-Limit Effect on Variable Amplitude Fatigue of Stiffeners, Journal of the Structural Division; ASCE - American Society of Civil Engineers; Journal of the Structural Division; 105; St12; 2657-26475; ASCE - American Society of Civil Engineers; 1979
- 173 Navrotskii D.J.; Determination of the stresses at points where transverse stiffening ribs are welded; Svar. Proiz; 5; 1-5; 1963
- 174 Ostermann H.; Wöhlerversuche mit Schweißproben aus Stahl St 37; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Bericht des Laboratoriums für Betriebsfestigkeit; 1522; not published; 1965
- 175 Wintergerst S., Heckel K.; Die Dauerfestigkeit von Flachstahl aus Stahl St 37 mit aufgeschweißter Quersteifung; Technische Hochschule; DE; Der Stahlbau; 35; 12; 353-357; 1966
- 176 Gönnel F.; Dauerfestigkeitsversuche an Schweißverbindungen aus Stahl St 37 mit und ohne Anstrich, Der Stahlbau 36, Nr. 7, S. 199-202, 1967; DE; Der Stahlbau; 36; 7; 199-202; 1967
- 177 N.N.; N-A-XTRA-Schwingverhalten; Stranski-Institut für Metallurgie, Hüttenwerke Oberhausen AG; DE; 1969
- 178 Friis L.E., Streneroth E.R.; Fatigue strength of welded joints in mild and high-strength structural steels; Jernkont. Ann.; 152; 1968
- 179 Harris F.G., Douglas R.B., Rowan R.W.; Axial load and bending fatigue tests on welded normalized manganese-silicon-steel; Department of Supply; 1969
- 180 Caracostea A., Salageanu H.; Die Anwendung des Stahles St 52-4 ak für geschweißte Stahlbrücken; Institutul de Cercetari si Projectari Tehnologice in Transporturi; Romaina; Bericht des CFR-ICPTT; 1970
- 181 Odegard K., Hembre P.; Fatigue tests of ship building steel, Part 2: Tests with notched and welded test pieces of "high tensile and ordinary ship building steel"; The Department for Testing Materials, The Technical University of Norway, The Ship Research Institute of Norway; NO; IIW-Document; XIII-598-70; IIW; 1970
- 182 Mummery A.; The fatigue strength of CO₂ fillet welds, The Welding Institute Research Bulletin, Vol. 12 and; The Welding Institute; The Welding Institute Research Bulletin; 12; The Welding Institute (TWI); 1971
- 183 Dißelmeyer H., Degenkolbe J.; Schwingverhalten eines hochfesten wasservergüteten Chrom-Molybdän-Zirkonium-legierten Feinkornbaustahles mit 70 kp/mm², Mindeststreckgrenze im geschweißten und ungeschweißten Zustand; Schweißen und Schneiden; 25; 3; 85-88; 1973
- 184 Hanzawa M., Yokota H., Ishiguro T., Takashima H., Kado S., Tanigaki T., Hashida Y.; The improvement of fatigue strength in welded high tensile strength steel by toe treatment; Products Research & Development Laboratories Nippon Steel Corporation; JP; IIW-Document; XIII-829-77; IIW; 1977
- 185 Kado S., Ishiguro T., Hanzawa M., Yokota H.; The improvement of fatigue strength in welded high tensile strength steels by additional weld run with coated electrodes; JP; IIW-Document; XIII-772-75; IIW; 1975
- 186 Kado S., Ishiguro T., Ishii N.; Fatigue strength improvement of welded joints by plasma arc dressing; Products Research & Development Laboratories Nippon Steel Corporation; JP; IIW-Document; XIII-774-75; IIW; 1975
-

-
- 187 Ikeda K., Denok S., Godai T., Ogawa T.; Improvement of fatigue strength of fillet welded joint for 80 kg/mm² high strength steel; Japan Welding Society; JP; Japan Welding Society; 7; 2; 1976
- 188 Bargel H.J., Helms R., Henke H., Wohler H.; Untersuchung der Schwingfestigkeit hochfester, schweißgeeigneter Feinkornbaustähle; Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM); Stahl und Eisen; 96; 21; 1038-1043; 1976
- 189 Kobayashi K., Matsumoto S., Tanaka M., Funakoshi T., Sakamoto N., Shinkawa K.; Improvement in the fatigue strength of fillet welded joint by use of the new welding electrode; Kawasaki Steel Corporation; JP; IIW-Document; XII-828-77; IIW; 1977
- 191 Knight J.W.; Improving the fatigue strength of fillet welded joints by grinding and peening; TWI The Welding Institut; UK; IIW-Document; XIII-851-77; IIW; 1976
- 192 Todoroki R., Hanzawa M., Ishiguro T., Yanagimoto S.; Effects of toe profile improvement on fatigue properties of welded joints; Nippon Steel Corporation; JP; IIW-Document; XIII-875-78; IIW; 1978
- 193 Minner H.H., Seeger T.; Erhöhung der Schwingfestigkeiten von Schweißverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen durch das WIG Nachbehandlungsverfahren; DE; Der Stahlbau; 46; 9; 257-263; 1977
- 194 Minner H.H., Seeger T.; Fatigue strength of welded and TIG-dressed high strength steels; Third International Symposium of the Japan Welding Society; 1978
- 195 Minner H.H., Seeger T.; Schwingfestigkeitsuntersuchungen an MAGM-geschweißten Stumpf- und Kehlnahtverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen St E 47 und St E 70; Institut für Statik und Stahlbau; DE; Oerlikon Schweißmitteilungen; 36; 83; 13-23; Oerlikon Schweißtechnik AG; 1978
- 196 Minner H.H., Seeger T.; Investigations on the fatigue strength of welded and TIG-dressed high strength steels; DVS - Deutscher Verband für Schweißtechnik; DE; IIW-Document; XIII-912-79; IIW; 1979
- 198 Gurney T.R., Woodley C.C.; Investigation into the fatigue strength of welded beams, Part III: High tensile steel beams with stiffeners welded to the web; British Welding Journal; 9; 9; 533-539; British Welding Research Association; 1962
- 199 Gaßner E., Griese F.W., Haibach E.; Ertragbare Spannungen und Lebensdauer einer Schweißverbindung aus Stahl St 37 bei verschiedenen Formen des Beanspruchungskollektivs; Archiv für das Eisenhüttenwesen; 35; 3; 255-267; 1964
- 200 Braithwaite A.G.M.; Fatigue tests on large welded plate girders; BWRA-Report; D7/36 A/65; 1965
- 201 Stallmeyer J.E., Munse W.H.; Behaviour of welded built up beams under repeated flexural loads; Department of Civil Engineering, University of Illinois; USA; Contract No.; CPR 11-7768; 1966
- 202 Kouba N.G., Stallmeyer J.E.; The behaviour of stiffened beams under repeated loads, Struct. Res. Series No. 173, Univ. of Illinois, April 1959; Civil Engineering Studies; USA; Structural Research Series; 173; 1959
- 203 Fielding D.J., Toprac A. A.; Fatigue tests of slender-weld hybrid plate girders under combined bending and shear, M.S. Thesis, University of Texas, Austin, Texas, June 1968; Center for Highway Research, The University of Texas; USA; Research report; 96-2; The Texas Highway Department; 1967
-

-
- 204 Haibach E., Olivier R.; Schwingfestigkeitsuntersuchungen an geschweißten Biegeträgern; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Bericht des Laboratoriums für Betriebsfestigkeit; 2150/4; 1969
- 205 Toprac A.A., Natarajan M.; Fatigue strength of hybrid plate girders, Journal of the Structural Division, ASCE, 26024; ASCE - American Society of Civil Engineers; USA; Journal of the Structural Division; 97; 4; 1203-1225; ASCE - American Society of Civil Engineers; 1971
- 206 Albrecht P.A.; Fatigue strength of welded beams with stiffeners; Lehigh University; USA; Dissertation; 1971
- 207 Salageanu H.; Vérification du comportement à la fatigue des assemblages soudés; Institutul de Cercetari si Proiectari Tehnologice in Transporturi; RO; Bericht des CFR-ICPTT; Institutul de Cercetari si Proiectari Tehnologice in Transporturi; 1978
- 208 Minner H.H., Seeger T.; Schwingfestigkeitsuntersuchungen an WIG-nachbehandelten Stumpf- und Kehlnahtschweißverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen St E 47 und St E 70, Oerlikon Schweißmitteilungen 37 Nr. 87, S. 4-15, 1979; Institut für Statik und Stahlbau; DE; Oerlikon Schweißmitteilungen; 37; 87; 4-15; Oerlikon Schweißtechnik AG; 1979
- 209 Harrison J.D.; Some tests on the effect of friction welded studs on fatigue; British Welding Journal; 12; 420-423; 1965
- 210 Roshardt W.; Einfluß des Aufschweißens von Bolzen auf das Grundmaterial; Schweizer Bauzeitung; 84; 51; 906-908; 1966
- 211 N.N.; Änderung des Bolzenschweißverfahrens mit Hubzündung zur Verringerung der Kerbwirkung am Grundblech , unveröffentlicht 1975; Forschungsbericht der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt München; 1975
- 212 N.N.; Untersuchungen zur Gütesicherung von Bolzenschweißungen an Kopfbolzendübeln einer Brücke; Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, TH Karlsruhe; DE; Unveröffentlichte Versuchsergebnisse; 1977
- 213 Welz W., Dietrich G.; Festigkeitsuntersuchungen an Bolzenschweißverbindungen; DE; Schweißen und Schneiden; 23; 8; 308-3011; 1971
- 214 Welz W., Dennin G; Dauerfestigkeit von Konstruktionen mit aufgeschweißten Bolzen; DE; Schweißen und Schneiden; 33; 2; 63-66; 1981
- 215 Albrecht P.; Predicting the Fatigue Life of Unpainted Steel Structures University of Maryland, MD, USA; USA; IABSE report; 37; 1982
- 216 Dawes M.G.; Static and Fatigue Tests on Welded Stainless Steel; British welding Research Association; Research Bulletin; 6; 12; British Welding Research Association; 1966
- 217 Honeycombe J., Gooch T.G.; The Effects of Microcracks on the Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Weld Metals; TWI The Welding Institut; Metal Construction; 5; 4; 140-147; 1973
- 218 Koskimaki M., Niemi E.; Fatigue Strength of Polarit 721-803 and 854 Welded Joints; Proc. Conference `Applications of Stainless Steel 1992` Stockholm, Sweden; 2; 1993
- 219 Yajima H.; Corrosion Resistance and fatigue Strength of Stainless Steels for Chemical Tankers; Mitsubishi Heavy Industrial Technical Review; 25; 3; Mitsubishi; 1988
-

-
- 220 McGoughy T.; Fatigue of Stainless Steel Weldments; EWI Research Report; J1144; 1994
- 221 Wylde J., Maddox S.; Effect of Misalignment on Fatigue Strength of Transverse Butt Welded Joints, IIW Document XIII-972-80; TWI The Welding Institut; UK; IIW-Dokument; XII-972-80; IIW; 1980
- 222 Garcia-Martin Z., Falco F.C.; Estudio sobre la resistencia a la fatiga de uniones a tope soldadas automaticamente por „FUSARC“ y „UNIONMELT“; Cien y Tecnica de la Soldadura; 9; 43; 1-19; 1958
- 223 Newman R.P., Gurney T.R.; Fatigue tests of plain plate specimens and transverse butt welds in mild steel; British Welding Journal; 6; 12; 569-594; 1959
- 224 Mueller G., Gregor V.; Ein Beitrag zum Problem der Dauerfestigkeit geschweisster Verbindungen aus Staehlen hoeherer Festigkeit, ZIS-Mitteilungen 7, Nr. 10, S. 1394-1414, 1965; ZIS-Mitteilungen; 7; 10; 1394-1414; 1965
- 225 Gurney T.R., Smith G.C.; Fatigue tests on 1 1/2 in. Thick transverse butt welds containing slag inclusions; British Welding Journal; 14; 1; 17-38; British Welding Research Association; 1967
- 226 Frost N.E., Denton K.; The fatigue strength of butt-welded joints in low-alloy structural steels, British Welding Journal, Vol. 14, No. 4, p. 157-163, 1967; National Engineering Laboratory; UK; British Welding Journal; 14; 4; 157-163; British Welding Research Association; 1967
- 227 Harrison J.D.; Further fatigue tests of 1 1/2 in. Thick butt welds containing slag inclusions; British Welding Journal; 15; 2; 85-94; 1968
- 228 N.N.; Prüfbericht über Dauerfestigkeitsversuche mit CO₂ - stumpf- geschweißten Prüfstäben; Institut für Statik und Stahlbau der TH Darmstadt; DAST-Versuchs-Nr. 3.11, Bericht vom 16. Juni 1969; 1969
- 229 Kunish J.; Fatigue property of field welds in steel plate desks, Journal of the Japan Society of Civil Engineers; Journal of the Japan Society of Civil Engineers; 54; 8; 52-59; 1969
- 230 Harrison J.D.; Fatigue tests on large butt welds, CIRIA-Report 19, p. 1-19, 1970; CIRIA-Report 19; 19; 1-19; 1970
- 231 Radziminski J.B., Lawrence F.V.Jr.; Fatigue of high-yield-strength steel weldments; IIW-Dokument; XIII-633-71; IIW; 1970
- 232 Donato L., Guerrera U., Sanpaolesi L., Bertero M.; Sugli acciai tipo T1 e relativi giunti saldati; Centro studi costruzioni metalliche dell' universita di Pisa; IT; Pubblicazione No.72; 72; 1972
- 233 Ekstrom D.H., Munse W.H.; The effect of internal weld defects on the fatigue behaviour of welded connections; Department of Civil Engineering, University of Illinois; USA; IIW-Dokument; XIII-678-73; IIW; 1973
- 234 N.N.; Dauerschwingversuche an Quernähten in Sondergüte mit Kreuzstrichraupen; Staatliches Materialprüfungsamt für Maschinenbau an der TU München; DE; Prüfungszeugnis; MT 17 502; 1973
- 235 Heckel K.; Die Dauerfestigkeit von Flachstahl aus St 37; Der Stahlbau; 39; 7; 205-208; 1973
-

-
- 236 Gregory E.N.; Galvanizing characteristics of steels and their weldments: Fatigue tests on butt and fillet welds; TWI The Welding Institut; IIW-Document; XIII-796-76; 1976
- 237 Iida K., Lino N.; Effect of angular distortion on fatigue strength of transverse butt-welds in high strength steels, , IIW-Document No. XIII-827-77, 1977; Japan Welding Society; IIW-Document; XIII-827-77; IIW; 1977
- 238 Haibach E., Olivier R., Kittel A.; Bruchmechanische Auswertung der Ergebnisse aus Wöhler- und Betriebsfestigkeitsversuchen für eine Stumpfnah mit rißähnlichem, unverschweißtem Wurzelspalt; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; Blech-Rohre-Profil; 25; 6; 262-266; 1978
- 239 Benoît D., Lieurade H.P., Truchon M.; Comportement en fatigue à programme de differents types de joints soudés bout à bout en acier E 355; IIW-Document; XIII-886-78; 1978
- 240 Dijkstra O.D., Wardenier J., Hertogs A.A.; The fatigue behavior of welded splices with and without mouse holes in IPE400 and HEM320 beams; TNO Institute and Delft University of Technology
- 241 Nacher A.; Contribution to Discussion by U. Guerrera, Symposium on Fatigue of Welded Structures; British Welding Journal; 7; 8; 513-516; 1960
- 242 Newman R.P., Gurney T.R.; Fatigue tests on ½ in. Thick transverse butt welds containing slag inclusions; British welding Research Association; British Welding Journal; 11; 7; 341-352; 1964
- 243 Locati L., Bollani G., Massa A.; Metallographic influences on Fe 52 carbon steel fatigue strength; IT; FIAT Report; 1969
- 244 Robakowski T.; L' influence de manque de pénétration à la racine sur la résistance à la fatigue des joints; IIW-Document; XIII-582-70; IIW
- 245 N.N.; Untersuchung von MIG-CO₂-stumpfgeschweißten Proben aus St 52-3, DAST-Versuchs-Nr. 4.3.02, , Untersuchung Nr. 7/71; Institut für Statik und Stahlbau der TH Darmstadt; DE
- 246 N.N.; Dauerversuche mit einseitig geschweißter Stumpfnah in V-Form auf Keramik-Unterlage, DAST-Versuchs-Nr. 4.3.01; Lehrstuhl und Institut für Stahlbau der TU München; Bericht vom 7. Juli 1971 und 11. Januar 1972
- 247 Kunihito T., Ando A., Nagai A., Ueda J., Otsuka T.; Low temperature fatigue behaviour of 9 % Ni steel weld joints; IIW-Document; XIII-649-72; IIW; 1972
- 248 Hoffmann E., Olivier R.; Schwingfestigkeitsversuche für den Stumpfstoß in übereinanderliegenden Gurtplatten; Der Stahlbau; 46; 9; 263-266; 1977
- 249 Nather F., Quel R.; MAG-geschweißte Stumpfnähte in dynamisch beanspruchten Bauteilen; DE; DVS Berichte Schweißen und Schneiden Fortschritt und Qualität; 50; DVS; 1978
- 250 Graf O.; Über Dauerzugversuche und Dauerbiegeversuche an Stahlstäben mit brenngeschnittenen Flächen; Autogene Metallbearbeitung; 29 C; 4; 1936
- 251 Königsberger F., Garcia-Martin Z.; Fatigue strength of flame cut specimens in bright mild steel; British Welding Journal; 2; Heft 1; 37-41; 1955
- 252 Königsberger F., Green H.W.; Fatigue strength of flame cut specimens in black mild steel; British Welding Journal; 2; Heft 7; 313-321; 1955
-

-
- 253 Bergquist L., Sperle J.O.; Fatigue strength of high strength steel beams with thermally cut surfaces; IIW-Document; XIII-922-79; IIW
- 254 Nibbering J.J.W., Thomas H., Bos T.J.; The properties of plasma cut edges; IIW-Document; XIII-922-79; IIW
- 255 Krüger U.; Ergebnisse aus Schwingversuchen an thermisch geschnittenen Proben unter Berücksichtigung der Güteigenschaften nach der Norm DIN 2310; Schweißen und Schneiden; 34; Heft 7; 325-330; 1982
- 256 Olivier R., Ritter W.; Schwingfestigkeitsversuche an brenngeschnittenen und an mechanisch nachbearbeiteten Versuchskörpern; Laboratorium für Betriebsfestigkeit; DE; LBF-Bericht Nr. 3871 (unveröffentlicht); 1977
- 257 Lornes H.; Dauerschwingfestigkeitsuntersuchungen an brenngeschnittenen Proben aus Stahl St 52-3 mit und ohne Nachbehandlungen auf der Grundlage von Rißfortschrittsmessungen; Institut für Schiffbau der Universität Hamburg; DE; AIF-Bericht Nr. 5062; 1984
- 258 Mang F., Bucak Ö., Koch E.; Fatigue behaviour of welded austenitic steels; 1993
- 260 Klöppel K., Weihermüller H.; Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen aus Stahl St 52; Technische Hochschule Darmstadt; DE; Der Stahlbau; 29; 5; 129-137; Ernst & Sohn; 1960
- 261 Stüssi F., Kollbrunner C.F.; Schrumpfspannungen und Dauerfestigkeiten geschweißter Trägerstöße; Institut für Baustatik Zürich; Switzerland; Mitteilungen aus dem Institut für Baustatik; 18; 1946
- 262 N.N.; Dauerfestigkeitswerte von Blechstreifen mit aufgeschweißten Bolzen , unveröffentlicht 1975; SLV München; DE; Forschungsbericht der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt München; 1975
- 263 Park K.S., Cho S.J., Ahn Y.H., Park J.S., Lee J.B., Lee C.S.; Comparison of fatigue properties of welded TMCP steel and normalized steel; Pohang University of Science and Technology Korea; Korea; 2003
- 264 Costa J.D.M., Ferreira J.A.M., Abreu L.P.M.; Fatigue behaviour of butt welded joints in a high strength steel; University of Coimbra, University of Aveiro; Portugal; Science Direct; 2; 697-705; Elsevier; 2010
- 265 Kim In-Tae, Yamada K., Kainuma S.; Fatigue behavior of butt welded joints containing inclined lack-of-penetration; Nagoya University; JP; Structural Eng./Earthquake; 18; 1; 53-62; JSCE; 2001
- 266 Haftirman, Syayuthi A.A.R., Afendi M., Abdul Majid M.S., Tee Chin Rong; Fatigue behaviour of butt welded joints in a mild steel; University Malaysia Perlis; Malaysia; International Conference on Marine Technology; 2012
- 267 Bowman M.D., Munse W.H., Will W.; Fatigue behaviour of butt welds with slag inclusions; University of Illinois and David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center; USA; 1984
- 268 Berger P.; Ermüdungsversuche an Trägern mit längs aufgeschweißten Knotenblechen; VEB Metalleichbaukombinat Forschungsinstitut Leipzig; DE; Schweißtechnik (Zeitschrift für alle Gebiete der Schweiß-, Schneid- und Löttechnik); 36; 6; 266-268; 1986
-

-
- 269 Berger P.; Zur Tragfähigkeit von Stumpfnähten bei Ermüdungsbeanspruchung; VEB Metalleichbaukombinat Forschungsinstitut Leipzig; DE; Schweißtechnik (Zeitschrift für alle Gebiete der Schweiß-, Schneid- und Löttechnik); 34; 9; 410-414; 1984
- 270 Hentschel K., Berger P., Rößler K., Schmidt M.; Übergangskerbgeometrie als bestimmende Größe für das Ermüdungsverhalten von Stumpfnähten; VEB Schwermaschinenbaukombinat Leipzig, Leichtbaukombinat Leipzig, Bergakademie Freiberg, Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR; DE; Schweißtechnik (Zeitschrift für alle Gebiete der Schweiß-, Schneid- und Löttechnik); 37; 2; 80-84; 1987
- 271 Lawrence F.V., Munse W.H.; Fatigue crack propagation in butt welds containing joint penetration defects; Welding Journal American Welding Soc; 52; 5; 221-225; Welding Research Supplement; 1973
- 272 Pijpers R.J.M., Kolstein M.H., Romeijn A., Bijlaard F.S.K.; Fatigue experiments on very high strength steel base material and transverse butt welds; TU Delft; NL; Advanced Steel Construction; 5; 1; 14-32; Advanced Steel Construction; 2009
- 273 Scott G.R., Stallmeyer J.E., Munse W.H.; Fatigue strength of transverse butt-welded joints in N-A-Xtra 100 Steel; The Civil engineering department University of Illinois in Cooperation with National Steel Corporation; USA; Structural Research Series (SRS); 254; Civil Engineering Studies; 1963
- 274 Graf O.; Versuche über den Einfluss der Gestalt der Enden von aufgeschweißten Laschen in Zuggliedern und von aufgeschweißten Gurtverstärkungen an Trägern; Universität Stuttgart; DE; Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau; B; 8; Verlag von Julius Springer; 1937
- 275 Fisher, John W.; Frank, Karl H.; Hirt, Manfred A.; McNamee, Bernard M.; Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams; Lehigh University Institute of Research; USA; Fritz Engineering Laboratory Report; 334; 2; 1969
- 276 Bergqvist, L.; Sperle, J.O.; Influence of TIG-Dressing in the Fatigue Strength of Coverplated Beams; International Institute of Welding - Swedish Delegation; SE; IIW-Document; XIII-826-77; IIW; 1977
- 277 Wilson W.M.; Wilder A.B.; Fatigue tests of butt welds in structural steel plates; University of Illinois; USA; University of Illinois Bulletin; XXXVI; 42; University of Illinois; 1939
- 278 Sung-Ku Kang; Thickness effect of fatigue on butt weld joints; Korea; TSCF 2016 Shipbuilders Meeting; 2016
- 279 Kim; Kim; Han et al; Influence of backing materials towards the fatigue strength of butt-welded joints; Pusan National University; Korea Institute of Industrial Technology; Korea; Mechanical Engineering Science; 225; 8; 1798-1807; Institution of Mechanical Engineers; 2011
- 280 Valtinat G., Huhn H.; Betriebsfestigkeit von stählernen gleitfesten Verbindungen von feuerverzinkten Bauteilen mit gestanzten Löchern und hochfesten vorgespannten Schrauben; Forschungsvorhaben; AiF-Nr. 12547/N4; 2003
- 282 Izdinsky, O.; Engine room sections in the construction of river vessels and the welding of steel reinforcements to the bottom plate; Zvaranie; Vol. 7; No. 7; pp. 363 – 368; 1958
- 284 Gurney, T.R.; Some fatigue tests on automatic longitudinal butt welds made from one side; The welding institute E/28/69; 1969
-

-
- 285 Fisher, W. E.; Stallmeyer, J. E.; Behaviour of welded build-up beams under repeated loads; University of Illinois; Urbana, Illinois, USA; Structural research series no. 147; 1958
- 289 K. Uchino, H. Sakurai, S. Sugiyama: Experimental Study on the fatigue strength of welded tubular K-joints; IIW Doc XIII-690-73; 1973
- 290 Maeda T., Uchino K., Sakurai H. Experimental Study on the fatigue strength of welded tubular K-joints; IIW-Doc XV-269-69; 1969
- 291 Hallam M.W.; The behaviour of stud shear connectors under repeated loading; Civil Engineering Laboratories, University of Sydney; AU; Research Report; 281; Univ. of Sydney, School of Civil Engineering, Civil Engineering Laboratories; 1976
- 292 Mainstone R.J., Menzies J.B.; Shear connectors in steel-concrete composite beams for bridges; UK; Current Paper; 68; 20; 291-302; 351-358; Building Research Station, Garston / Watford / Herts; 1968
- 301 Ram, P.; Herion, S.; Bergers, J.; Sedlacek, G.; Müller, C.; Stötzel, J.; Höhler, S.; Bucak, Ö.; Lorenz, J.; Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Krankonstruktionen bei Einsatz hoch- und ultrahochfester Stähle; FOSTA; DE; FOSTA Abschlussbericht; P512; 2006
- 302 Ummenhofer, T.; Herion, S.; Hrabowski, J.; Feldmann, M.; Eichler, B.; Bucak, Ö.; Lorenz, J.; Bernd, B.; Eiwan, C.; Stötzel, J.; Bemessung von ermüdungsbeanspruchten Bauteilen aus hoch- und ultrahochfesten Feinkornbaustählen im Kran- und Anlagenbau; FOSTA; DE; FOSTA Abschlussbericht; P778; 2013
- 303 Araque, O.; Arzola, N.; Hernández E.; The effect of weld reinforcement and post-welding cooling cycles on fatigue strength of butt-welded joints under cyclic tensile loading; Universidad de Ibagué; Universidad Nacional de Colombia; CO; MDPI; 11; 4; 2018
- 304 Sung-Wook Kang; Yong-Man Park et. all; Study on fatigue experiment for transverse butt welds under 2G and 3G; Seoul National University; Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd; Korea; IJNAOE SNAK; 7; 5; 833-847; International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering; 2015
- 305 Keindorf, C.; Schaumann, P.; Ahmed, H.; et. all; High frequency fatigue testing of butt welds with a new magnet resonance machine; SKI Ingenieures mbH; Insitute of Steel Constructio; ArcelorMittal Global R&D Gent; DE; BE; 63rd annual assembly & international conference of the IIW; 149-156; 2010
- 306 Sungho Kim; Keunchan Jin; Wan Sung; Sppwpp Nam; Effect of lack of penetration on the fatigue strength of high strength steel butt weld; Korea; KSME Journal; 8; 2; 191-197; Korean Society of Mechanical Engineers; 1994
- 307 Heikki Remes; Fatigue tests of CO₂-Laser, CO₂-Laser hybrid and submerged arc welded butt joint of raex S275 laser amd NVA; Helsinki University of Technology; Finland; Teknillinen korkeakoulu laivalaboratorio; 1; 2003
- 308 Pijpers R.J.M; Fatigue strength of welded connections made of very high strength cast and rolled steels; Technische Universiteit Delft; NL; Wöhrmann Print Service; 2010
- 309 Gotkowski P.; Fatigue strength of butt joints made with a steel weld-backing; Instytut Spawalnictwa; PL; Welding International; 8; 5; 346-348; Welding International; 1994
-

-
- 310 Mang, F.; Herion S.; Sedlacek, G.; Müller, C.; Kästner, M.; Bemessungsregeln zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Krankonstruktionen - Klassifizierung von kranbauspezifischen Kerbdetails; Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, TH Karlsruhe; Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen; DE; FOSTA Abschlussbericht; P293; Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.; 2000
- 311 Weich, I.; Ummenhofer, T.; Nietschke, Th. et all.; Fatigue behaviour of welded high-strength steels after high frequency mechanical post-weld treatments; Universität Braunschweig und Karlsruhe; DE; Welding in World; 53; 11; 2009
- 312 Harris, L.A.; Nordmark, G.E.; The fatigue and static properties of butt welds in structural steels; University of Illinois; USA; Civil Engineering Studies, Structural Research Series; 10; 1954
- 313 Kuhlmann, U.; Breuning, S.; Ummenhofer, T.; Weidner, P.; Entwicklung einer DASt-Richtlinie für Höherfrequente Hämmerverfahren; Universität Stuttgart und Karlsruher Institut für Technologie; DE; IGF-Forschungsvorhaben; 17886; 259; Deutschen Ausschuss für Stahlbau e. V.; 2018
- 314 Kuhlmann, U.; Ummenhofer, T.; Kudla, K.; Weidner, P.; Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau; Universität Stuttgart und Karlsruher Institut für Technologie; DE; Abschlussbericht; 309; Bundesanstalt für Wasserbau; 2013
- 315 Kuhlmann, U.; Bergmann, J.; Dürr, A.; Thumser, R.; Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung; Universität Stuttgart und Materialforschungs- und Prüfanstalt Bauhaus-Universität Weimar; DE; AiF-Vorhaben; 13866; 208; Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.; 2006
- 316 Gurney, T.R.; The Fatigue Strength of Transverse Fillet Welded Joints; Abington Publishing; 1991
- 317 Kulak, G.L.; Baker, K.A.; Fatigue strength of a groove weld in steel backing; Department of Civil Engineering, University of Alberta; CA; Journal of Constructional Steel Research; 12; 03. Apr; 261-378; Elsevier; 1989
- 331 Maddox, S.J.: Fatigue of welded joints loaded in bending, "Supplementary Report 84UC" 41 Transport and Road Research Laboratory Crowthorne United Kingdom 1974
- 332 Vis, R., Stark, J.W.B.: Onderzoek naar het gevaar voor het ontstaan van vermoeiingsscheuren in de langslas tussen het dek en de verstijvingsrib in een orthotrope plaatbrug, Report B-76-398, Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, Delft Netherlands, 1973
- 333 Johnston: Measurements and interpretation of dynamic loads in bridges – phase IV: Fatigue design of orthotropic steel decks of road bridges, Final Report ECSC 7210-SA/823 (Unpublished Project Report PR/CE/54/95) Transport and Road Research Laboratory Crowthorne United Kingdom 1995
- 334 Maddox, S.J. Fatigue of partial penetration trough stiffener to deck plate welds 1979
- 335 Janss, J.: Fatigue of welds in orthotropic bridge deck panels with trapezoidal Stiffeners, Journal of Constructional Steel Research 91, SS.147-154, 1988
- 336 Bruls, A.: Assessment of Fatigue Life of orthotropic Steel Decks, Proceedings of IABSE, Workshop Remaining Fatigue Life of Steel Structures of Steel Structures, SS. 259-269, 1990
-

-
- 337 Bignonnet, A., Jacob, B., Caracilli, J., LaFrance, M.: Fatigue resistance of orthotropic steel decks, Proceedings IABSE: Workshop Remaining Fatigue Life of Steel Structures SS. 227- 236, 1990
- 338 Kolstein, M.H., Wardenier, J.: Fatigue Analysis of a cracked steel deck using-measured stress spectra and full-scale laboratory tests, Proceedings IABSE, 4th International Conference on Bridge Management, 2000
- 339 Dijkstra, O.D., Nicolaas, T.: Vermoeiingsonderzoek reparatiemethode trog dekplaat verbindingen Moerdijkbrug, TNO report 2000-CON-R4016, Netherlands2000
- 340 Erzurumlu, H., Toprac, A.A.:Fatigue of orthotropic steel decks "Journal of the Structural Division" SS. 813-829, 1972
- 341 Tromp, W.A.J.: Fatigue of field splices in ribs of orthotropic steel bridge decks, Report 6-74-16 by Stevin Laboratory, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 1974
- 342 Cuninghame, J.R.: Steel bridge decks: fatigue Performance of joints between longitudinal stiffeners, Laboratory Report 1066 of Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, United Kingdom, 1982
- 343 Haibach, E., Plasil, I.: Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit von Stahlleichtfahrbahnen mit Trapezhohlsteifen im Eisenbahnbrückenbau, Germany, Der Stahlbau 9, 1983 SS. 269-274, 1983
- 344 Agerskov, H., Bjørnbak-Hansen, J. "Fatigue investigation on orthotropic steel bridge deck" International Institute of Welding Tokyo Japan "Document XIII-1195-86 / XV-605-86, 1986
- 345 Kondo, A., Yamada, K., Kikuchi, Y., Miyagawa, K., Aoki, H.: Fatigue strength of field-welded rib joints of orthotropic steel decks, Proceedings International Conference: Fatigue of Steel and Concrete, International Association of Bridges and Structural Engineering, SS.777-784, 1982
- 346 Yamada, K., Kondo, A., Aoki, H., Kikuchi, Y.: Fatigue strength of field-welded rib joints of orthotropic steel decks, International Institute of Welding IIW Doc. XIII-1282-88, NagoyJapan, 1988
- 347 Kolstein, M.H., Leendertz, J.S.: Fatigue design of European orthotropic steel bridge decks – Part 1: Field-welded rib joints, Delft University of, Faculty of Civil EngineeringTechnology"DelftNetherlands, 1989
- 348 Kolstein, M.H., Back, J.: Fatigue behaviour of field-welded rib joints in orthotropic steel bridge decks, Proceedings IABSE Workshop Remaining Fatigue Life of Steel Structures, SS. 237-248, 1990
- 349 Caramelli, S., Froli, M., Croce, P., Sanpaolesi, L.: Misure ed interpretazioni deicarichi dinamici sui ponti – terza fase : resistenza a fatica di piastre ortotropeper ponti in acciaio, relazione technical finale CECA N0 7210-KD/411, Università di Pisa, Istituto di scienza delle costruzioni, Laboratorio ufficiale perle esperienze dei materiali da costruzione, Pisaltaly, 1989
-

-
- 350 Caramelli, S., Froli, M., Croce, P., Sanpaolesi, L.: Fatigue behaviour of orthotropic steel bridge decks, Proceedings IABSE Workshop Remaining Fatigue Life of Steel Structures, SS. 271-280, 1990
- 351 Kolstein, M.H.: Fatigue performance of joints between closed longitudinal stiffeners in orthotropic steel bridge decks – part 2: optimisation of the splice joint" "Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Delft Netherlands, Stevin Report 25.6.93.26, 1993
- 352 Kolstein, M.H., Leendertz, J.S.: Fatigue design of European orthotropic steel bridge decks, Report EUR 20032 EN (ECSC Contract No 7210-SA/610) Directorate General for Research, Luxembourg, 2001
- 353 Caramelli, S., Froli, M., Croce, P., Sanpaolesi, L.: Misure ed interpretazioni deicarichi dinamici sui ponti – quarta fase : resistenza a fatica dei ponti in acciaio, Relazione technical finale CECA N0 7210-SA/415, Universitàdi Pisa, Istituto discienza delle costruzioni, Laboratorio ufficiale per le esperienze dei materialida costruzione, 1994
- 354 Hänsch, H., Müller, G.: Dauerfestigkeitsversuche an geschweissten Hohlrippenanschlüssen Germany Schweisstechnik 11 Heft 5, SS. 193- 198, 1961
- 355 Nunn, D.E: An investigation into the fatigue of welds in an experimental orthotropic bridge deck panel, Transport and Road Research Laboratory Crowthorne United Kingdom Laboratory Report 629, 1974
- 356 Cuninghame, J.R.: Strengthening fatigue prone details in a steel bridge deck Brighton United Kingdom, Proceedings Welded Structures, SS. 38/1-38/11, 1987
- 358 Lehrke, H-P.: Messung und Interpretation von Dynamischen Lasten an Stahlbrücken – Phase III: Schwingfestigkeitsverhalten von orthotropen Platten in Stahlstrassenbrücken, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt Germany Final report ECSC research 7210-KD/119, 1989
- 359 Lehrke, H-P. Fatigue tests of stiffener to crossbeam connections, Lausanne Switzerland, Proceedings IABSE Workshop Remaining Fatigue Life of Steel Structures, SS. 249-257, 1990
- 360 Kolstein, M.H., Back, J. de "Measurement and interpretation of dynamic loads on bridges - phase 3: fatigue strength of orthotropic steel decks Stevin Report 25.6.91.02, Final Report, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 1991
- 361 Beales, C.: Measurement and interpretation of dynamic loads on bridges –phase 3: Fatigue behaviour of orthotropic steel decks of road bridges, Final report ECSC Agreement Number 7210-KD/807 Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, United Kingdom, 1989
- 362 Beales, C.: Assessment of trough to crossbeam connections in orthotropic steel bridge decks, Research report 276, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne United Kingdom, 1990
-

-
- 363 Lehrke, H-P.: Messung und Interpretation von Dynamischen Lasten an Stahlbrücken – Phase IV: Weitere Untersuchungen zur Schwingfestigkeit orthotroper Fahrbahnplatten von Stahlstrassenbrücken, Final report ECSCresearch 7210-SA/115, Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit Darmstadt, 1995
- 364 Mang, F., Bucak, Ö., Karcher, D. Fatigue of orthotropic steel bridge decks, Proceedings of the 3rd International Conference on Steel and Aluminium in Istanbul, SS. 301-308, 1995
- 365 Kolstein, M.H., Leendertz, J.S., Wardenier, J.: Fatigue performance of the trough to crossbeam connection in orthotropic steel bridge decks , Malmö, Sweden Proceedings Nordic Steel Conference, 1995
- 366 Fisher, J.W.: Improved performance through large scale dynamic testing of structures, San Francisco, USA, Proceedings International Conference on Performance of Dynamically Loaded Welded Structures, IIW 50th Annual Assembly Conference SS. 1-21, 1997
- 367 Kolstein, M.H.: Site measurements orthotropic deck bascule bridge van Brienoord, Stevin report 6.98.4 Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Delft, 1998
- 368 Bruls, A.; Measurement and interpretation of dynamic loads in bridge - Phase 3: Fatigue behaviour of orthotropic steel decks; Synthesis Report; Commission of the European Communities; 1991
- 373 Cuninghame, J.R.: Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks, Research Report 259, Transport and Road Research Laboratory Crowthorne, United Kingdom, 1990
- 374 F. Mang, S. Herion, O. Fleischer, E. Koch: Untersuchung von Zug-Druck-Kallotenlagern im Großversuch; Stahlbau 72 Heft 1, SS. 43 – 49, 2003
- 375 G. Valtinat: Gutachtliche Äußerung zu hochfesten Paßschrauben HVP M 36 × 200 nach DIN 7999. Feststellung des Abscherverhaltens und der Ermüdungsfestigkeit, Hamburg-Harburg, 1999
- 376 J. Unglaub, M. Reininghaus, K. Thiele: Zur Ermüdungsfestigkeit von feuerverzinkten Zugstäben mit Endgewinde, Stahlbau 84, Heft 8 SS. 584 - 588, 2015
- 377 M. Dobmeier: Dauerfestigkeit exzentrisch liegender, vorgespannter Schrauben. Dipl.-Arbeit (nicht veröffentlicht), Lehrstuhl für Stahlbau, Bundeswehr Universität München, 1997
- 378 C. Petersen Nachweis der Betriebsfestigkeit exzentrisch beanspruchter Ringflanschverbindungen, Stahlbau 57, Heft 3, SS. 191 – 203, 1998
- 379 R. Glienke, C. Blunk, C. Denkert, M.-C. Wanner Bemessung und Ausführung von Verbindungen mit Schließringbolzen im Stahlbau, Stahlbau 84, Heft 12, SS. 980 – 997, 2015
- 380 Lacher, G., Kießlich, H. P., Bernert, J. Zeit- und Dauerfestigkeit von hochfesten Schrauben der Güte 10.9 unter axialem Zug, Ermittlung der Wöhlerlinien – 1. Teilprogramm: Feuerverzinkte Schrauben M20, Institut für Stahlbau Universität Hannover, Germany, 1985
-

-
- 381 P. Schaumann, R. Eichstädt: Ermüdung sehr großer HV-Schraubengarnituren, Stahlbau 85 Heft. 9 SS. 604–611, 2016
- 382 P. Schaumann, F. Marten: Fatigue Resistance of High Strength Bolts with Large Diameters, Proceedings of the International Symposium for Steel Structures ISSS 2009, Seoul, South Korea, 2009
- 383 P. Schaumann, R. Eichstädt, M. Oechsner, F. Simonsen: Institut für Stahlbau, Stahlbau 84, Heft 12, SS.1010 – 1015, 2015
- 384 B. Wichtowski, Untersuchung zur Ermüdungsfestigkeit von Paßschrauben beim Abscheren, Stahlbau 76, Heft 4, SS- 235 – 240, 2007
- 390 Nagai, K., Iwata, M., Kang S. W., Arai, M.: Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Joints of Mild Steel under Pulsating Tension Loading, Journal of the Society of Naval Architects of Japan Nr. 148 SS. 261-267, 1980
- 391 Nagai, K., Iwatata, M., Fujimoto, Y., and Kang, S.: An Improvement of the Fatigue Strength in Fillet Welded Cruciform Joints of Mild Steel under Pulsating Tension Loading, Journal of the Society of Naval Architects of Japan Nr. 150 SS. 456-461, 1981
- 392 Denny, A. K., Jubb, J. E. M.: Fatigue Crack Propagation in Submerged Arc Cruciform Welded Joints, 7th Welding Research Council of The Engineering Foundation (New York), SS. 57-82 The Welding Institute (TWI), 1977
- 393 N.N. Data Sheets on Fatigue Properties for Load-Carrying Cruciform Welded Joints in SM50B Rolled Steel for Welded Structure: Effect of specimen size National Research Institute for Metals Tokyo Japan NRIM Fatigue Data Sheet National Research Institute for Metals, 1980
- 394 Seeger T., Olivier R.: Neigung und Abknickpunkt der Wöhlerlinie von Schubbeanspruchten, FG Werkstoffmechanik, Der Stahlbau 61, Heft. 5, SS.137-142, 1992
- 395 Lotsberg I.: Fatigue Capacity of Load Carrying Fillet-Welded Connections Subjected to Axial and Shear Loading, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering Nr. 131, 2009
- 1000 F. Mang, S. Herion, G. Sedlacek, C. Müller, M. Kästner: Bemessungsregeln zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Krankonstruktionen, FOSTA Forschungsbericht P293 , 2000
- 1001 R. Puthli, S. Herion, J. Bergers, G. Sedlacek, C. Müller, J. Stötzel, S. Höhler, Ö. Bucak, J. Lorenz: Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Krankonstruktionen bei Einsatz hoch- und ultrahochfester Stähle, FOSTA Forschungsbericht P512, 2006
- 1002 T. Ummenhofer, S. Herion, J. Hrabowski, M. Feldmann, B. Eichler, Ö. Bucak, J. Lorenz, B. Boos, C. Eiwand, J. Stötzel: Bemessung von ermüdungsbeanspruchten Bauteilen aus hoch- und ultrahochfesten Feinkornbaustählen im Kran- und Anlagenbau, FOSTA Forschungsbericht P778, 2013
-

-
- 1003 M. Feldmann, J. Hegger, O. hechler, S. Rauscher: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundmitteln unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Verwendung hochfester Werkstoffe, FOSTA Forschungsbericht P621, 2007
- 1004 M. Feldmann, M. Gündel, M. Kopp, J. hegger, J. Gallwoszus, S. Heinemeyer, G. Seidl, O. Hoyer: Neue Systeme für Stahlverbundbrücken FOSTA Forschungsbericht P804, 2012
- 1005 M. Lukic, M. Al-Emrani, M. Aygül, M. Bokesjö, P. Collin, M. Nilsson, B. Eichler, N. Schillo, M. Wieschollek, B. Imam, T. Righiniotis, G. Kaliyaperumal, A. Pitsolis: BRIFAG - Bridge fatigue guidance Final Report RFCS, 2013
- 1006 M. Veljkovic, C. Heistermann, W. Husson, M. Limam, M. Feldmann, J. Naumes, D. Pak, T. Faber, M. Klose, K-U. Fruhner, L. Krutschinna, C. Baniotopoulos, I. Lavasas, A. Pontes, E. Ribeiro, M. Hadden, R. Sousa, L. da Silva, C. Rebelo, R. Simoes, J. Henriques, R. Matos, J. Nuutinen, H. Kinnunen: HISTWIN - High-strength tower in steel for wind turbines, RFCS Final Report , 2012
- 1007 Mang F., Konlak, Bucak Ö.: Zeit- und Dauerfestigkeit von gewalzten I-Profilen mit angeschweißten Stegaussteifungen - Teil 1: Versuchstechnische Untersuchungen, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine Karlsruhe AIF Forschungsbericht 7678, 1992
- 1008 Mang F., Bucak Ö., Wolfmüller Bemessungsverfahren für T-Knoten aus Rechteck-Hohlprofilen Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine Karlsruhe Germany Forschungsbericht Projekt 82 Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V. 1991
- 1009 Mang F., Bucak Ö., Steidel G.: Über den Einfluss von Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit von Hohlprofil-Knoten, Schriftenreihe des Instituts für Förder-technik 5, 1983
- 1010 Mang F., Bucak Ö., Klingler J., Becker F., Henrion R., Stammel A.: Geschweisste Stumpfstoße an gewalzten H-Trägern, Technica 38 (1989) Heft 2, SS.59-64
- 1011 Mang F., Bucak Ö., Steidel G.: Eigenspannungen geschweißter Hohlprofilverbindungen und deren Einfluß auf die Zeit- und Dauerfestigkeit, Forschungsbericht der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Projekt 93, 1983
- 1012 Dutta D., Mang F., Wardenier J.: Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Hohlprofil-Verbindungen, CIDECT-Monografie 7, Beratungsstelle für Stahlanwendung, 1981
- 1013 Puthli R., Herion S., Hrabowski J., Ummenhofer T., Weich I., et al. Detaillösungen bei Ermüdungsfragen und dem Einsatz hochfester Stähle bei Türmen von Offshore-Windenergieanlagen Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine; Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerke Karlsruhe; Braunschweig Germany; Germany FOSTA-Forschungsbericht FOSTA P 633 FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. 2008
-

-
- 1014 Ummenhofer T., Herion S., Rack S., Weich I., Telljohann G., et al.: REFRESH - Lebensdauererlängerung bestehender und neuer geschweißter Stahlkonstruktionen, Forschungsbericht P 702, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V 2011
- 1015 Lagerqvist O., Völling B., Lieurade H.-P., Herion S., Martsch R.-M., et al.: LIFTHIGH - Efficient lifting equipment with extra high strength steel technical steel, research report EUR 22569 EN, Luxembourg Office for Official Publications of the European Communities, 2007
- 1016 Kuhlmann, U.; Maier, P.; Gervasio, H.; Popa, N.; Orcesi, A.: Sustainable Steel-Composite Bridges in Built Environment ,RFCS Final Report, 2013
- 1017 Kuhlmann, U. Euler, M.; Roos E.; Rettemmeier, P.; Herion. S.; Lipp, A.: Ermüdungsverhalten von Stahlkonstruktionen unter multiaxialer Beanspruchung durch Radlasten,DFG Final Report, 2016
- 1018 Kuhlmann, U.; Ummenhofer, T.; Kudla, K.; Weidner. P.: Untersuchung zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau, Abschlussbericht des Bundesanstalt für Wasserbau BAW, 2013
- 1019 Kuhlmann, U.; Euler, M.:Versuchsbasierte Ermüdungsfestigkeiten der Radlasteinleitung, FOSTA-Forschungsbericht P895, 2013
- 1020 Kuhlmann, U., Euler, M., Hubmann, M., Mangerig, I., Hess, A., Bucak, Ö., Fischl, A., Kranz, B., Herrmann, Zschech, R.: Ermüdungsgerechte Fachwerke aus Rundhohlprofilen mit dickwandigen Gurten, FOSTA-Forschungsbericht P815, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 2013
- 1021 Kuhlmann, U.; Euler, M.: Weiterentwicklung und Spezifizierung der Ermüdungsnachweise für Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Stahl, DAST Abschlussbericht, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, 2011
- 1022 Kuhlmann, U.; Bergmann, J.; Dürr, A.; Thumser, R.: Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung, FOSTA-Forschungsbericht, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. 2006
- 1023 Kuhlmann et al.: Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit, FOSTA-Forschungsbericht P 843, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 2014
- 1024 Kuhlmann, U., Breunig, S., Ummenhofer, T., Weidner, P.: Entwicklung einer DAST - Richtlinie für Höherfrequente Hämmerverfahren, DAST-Forschungsbericht, IGF Forschungsbvorhaben 17886, 2018
- 1025 Kuhlmann, U., Kudla, K.; Drebenstedt, K.: Ermüdungsfestigkeit von Montagestößen in Vollwandträgern mit dicken Gurte, DAST-Forschungsbericht, AiF Vorhaben 17104, DAST 2018
- 1026 Kuhlmann, K, Euler M.: Kranbahnträger - Wirtschaftliche Bemessung und Konstruktion robuster Radlasteinleitung, DAST-Forschungsbericht, AiF Vorhaben 14173, 2008
- 1027 Ummenhofer T., Herion S., Veselcic M., Dietrich R., Nussbaumer A., Zamiri F.: Optimaler Einsatz von Hohlprofilen und Gussknoten im Brückenbau aus Stahl

- S355 bis S690, FOSTA-Forschungsbericht P 816, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 2014
- 1028 Ummenhofer T., Weidner P., Zinke T., Mehdiانpour M., Rogge A.: Fertigungs- und Instandhaltungsoptimierung bei Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen, FOSTA-Forschungsbericht P 864, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 2016
- 1029 Melz, T., Möller, B., Baumgartner, J., Ummenhofer, T., Herion, S., Hrabowski, J., Henkel, J., Boos, B.: Erweiterung des örtlichen Konzeptes zur Bemessung von LCF-beanspruchten geschweißten Kranstrukturen aus hochfesten Stählen, FOSTA-Forschungsbericht P 900, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 2015
- 1030 Ummenhofer T., Engelhardt I.: Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von Offshore-Windenergieanlagen durch Schweißnahtnachbehandlung unter Berücksichtigung des Korrosionseinflusses, DVS Abschlussbericht DVS 09.068, IGF Vorhaben 18457 N, 2018

21 Danksagung

Acknowledgement

Das Institut für Stahlbau der RWTH Aachen, die Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des KIT und das Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart bedanken sich bei den Mitgliedern des Arbeitskreises für das starke Engagement bei der Bereitstellung von Material, der Herstellung der Probekörper und der Beteiligung am projektbegleitenden Ausschuss. Dadurch wurde die erfolgreiche Projektdurchführung erst ermöglicht. Insbesondere gilt der Dank folgenden Firmen:

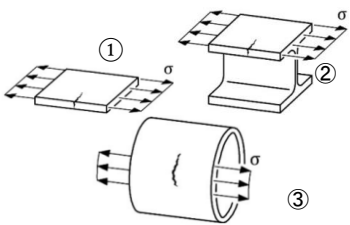
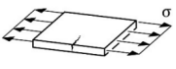
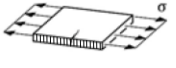
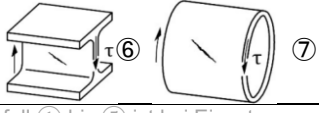
- AG der Dillinger Hüttenwerke
- Peiner Träger GmbH
- FREYLER Industriebau GmbH
- August Friedberg GmbH
- Donges SteelTec GmbH
- Zwickauer Sonderstahlbau GmbH
- Max Bögl

22 Anhang A – Verbesserte Kerbfalltabellen

Annex A – Improved Detail category tables

Tabelle 8.1 – Ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmittel

Table 8.1 – Plain members and mechanically fastened joints

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160		<p>Gewalzte oder extrudierte Erzeugnisse unter Normalspannung:</p> <p>① Bleche und Fachstähle mit gewalzten Kanten</p> <p>② Walzprofile mit gewalzten Kanten</p> <p>③ Nahtlose rechteckige oder runde Hohlprofile</p>	①, ②, ③: Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.
160 <i>m = 5</i>		<p><u>Gescherte oder brenngeschnittene Bleche:</u></p> <p>④: Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung</p>	④: Alle sichtbaren Randkerben sind zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen. Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z.B. Schleifen) müssen parallel zu den Spannungen verlaufen.
140#		<p>⑤: Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennriefen oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung.</p> <p>Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.</p>	④, ⑤: Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung ≤ ¼) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen. Keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut
100 <i>m = 5</i>		⑥, ⑦: Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse entsprechend der Kerbfälle ①, ②, ③	⑥, ⑦: $\Delta\tau$ berechnet sich nach: $\tau = \frac{V \cdot S(t)}{I_t}$

Für Kerbfall ① bis ⑤ ist bei Einsatz von wetterfestem Stahl der nächsttiefere Kerbfall zu verwenden.
140#: Jedoch durch $\Delta\sigma_c = 160$ mit $m = 5$ nach oben begrenzt

Tabelle 8.1 – Ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmittel (fortgesetzt)

Table 8.1 – Plain members and mechanically fastened joints (continued)

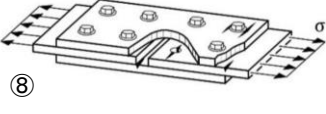
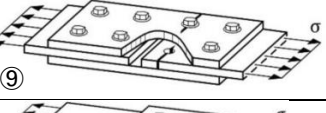
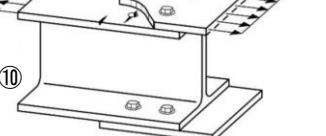
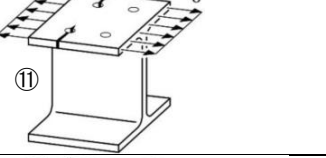
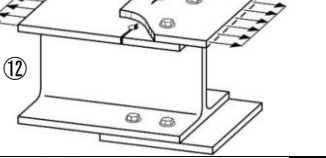
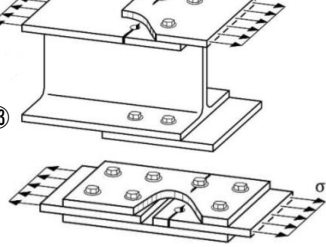
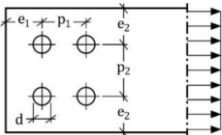
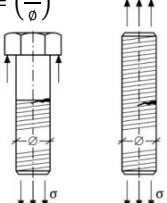
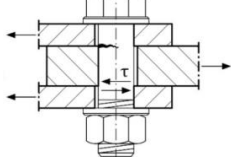
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
112 $m = 5$		⑧: Symmetrische zweiseitige Verbindung mit hochfesten 100% vorgespannten Schrauben oder 100% vorgespannten Injektionsschrauben	⑧: $\Delta\sigma$ ist am Bruttoquerschnitt aller Bleche zu ermitteln, die eine Stelle mit möglicher Rissbildung enthalten. Bei der Verwendung von S460 darf Kerbfall 125 verwendet werden.
80		⑨: Zweiseitige Verbindung mit Passschrauben oder mit nicht vorgespannten Injektionsschrauben	⑨: $\Delta\sigma$ ist am Nettoquerschnitt aller Bleche zu ermitteln, die eine Stelle mit möglicher Rissbildung enthalten.
90		⑩: Einschnittige gestützte Verbindung mit hochfesten vorgespannten Schrauben oder vorgespannten Injektionsschrauben.	⑩: $\Delta\sigma$ ist am Bruttoquerschnitt aller Bleche zu ermitteln, die eine Stelle mit möglicher Rissbildung enthalten
90		⑪: Bauteile mit Löchern unter Biegung und/oder Normalkraft	⑪: $\Delta\sigma$ ist am Nettoquerschnitt zu ermitteln.
80		⑫: Einschnittige gestützte Verbindung mit Passschrauben oder nicht vorgespannten Injektionsschrauben	⑫: $\Delta\sigma$ ist am Nettoquerschnitt aller Bleche zu ermitteln, die eine Stelle mit möglicher Rissbildung enthalten.
50		⑬: Einschnittige gestützte oder symmetrische zweiseitige Verbindung mit Lochspiel und nicht vorgespannten Schrauben. Keine Lastumkehr.	⑬: $\Delta\sigma$ ist am Nettoquerschnitt aller Bleche zu ermitteln, die eine Stelle mit möglicher Rissbildung enthalten.
Allgemein gilt für geschraubte Verbindungen - Kerbfälle ⑧ bis ⑬ - die Einhaltung folgender Lochabstände:			
 $e_1 \geq 1,5d$ $e_2 \geq 1,5d$ $p_1 \geq 2,5d$ $p_2 \geq 2,5d$			
56	Größenabhängigkeit für $\varnothing > 30$ mm: $k_s = \left(\frac{30}{\varnothing}\right)^{0,25}$	⑭: Schrauben und Gewindestangen unter Zug: gerolltes Gewinde	⑭: $\Delta\sigma$ ist am Spannungsquerschnitt zu ermitteln. Biegung und Zug infolge Abstützkräften sowie weitere Biegespannungen sind mittels numerischer Berechnung oder analytischer Modelle zu berücksichtigen. Bei vorgespannten Schrauben darf die reduzierte Spannungsschwingbreite berücksichtigt werden.
45		geschnittenes Gewinde	
100 $m = 5$		⑮: Schrauben in ein- oder zweiseitigen Scher-Lochleibungsverbindungen – Passschrauben – Schrauben ohne Lastumkehr	⑮: $\Delta\tau$ ist am Schaftquerschnitt zu ermitteln. Das Gewinde darf nicht in der Scherfläche bzw. den Scherflächen liegen. Die Schrauben sollten den Güten 5.6, 8.8 oder 10.9 nach EN 1993-1-8 genügen.

Tabelle 8.2 – Geschweißte zusammengesetzte Querschnitte

Table 8.2 – Welded built-up sections

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
125			②: Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte.	Es dürfen keine Schweißansatzstellen vorhanden sein. Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Detail ⑥ oder ⑦ in Tabelle 8.5 nachzuweisen.
112			③: Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Doppelkehlnähte oder beidseitig durchgeschweißte Nähte, beide mit Ansatzstellen.	Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Detail ⑥ oder ⑦ in Tabelle 8.5 nachzuweisen.
112			④: Mit Automaten oder voll mechanisiert einseitig durchgeschweißte Naht mit nicht unterbrochener Schweißbadsicherung ohne Ansatzstellen.	
100			wie zuvor, mit Ansatzstellen	
112			⑤: Handgeschweißte Doppelkehlnähte oder handgeschweißte beidseitig durchgeschweißte Nähte	Die Enden von aufgeschweißten Gurtplatten sind gem. Detail ⑥ oder ⑦ in Tabelle 8.5 nachzuweisen.
100			Von Hand oder mit Automaten oder voll mechanisiert einseitig durchgeschweißte Nähte oder Kehlnähte bei Hohlkästen.	
100	⑦ Reperaturschweißung	siehe oben	⑥: Reparierte mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte oder handgeschweißte Kehlnähte oder durchgeschweißte Nähte der Details ① bis ⑥.	
Ursprünglicher Kerbfall			wie zuvor, aber mit Nachschleifen der Schweißnahtübergänge der Details ① bis ⑥	
71			⑧: Unterbrochene Längsnähte.	$\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Grundmaterial berechnet.
71			⑨: Stumpfnähte, Kehlnähte oder unterbrochene Nähte mit Freischnitten (kleiner 60 mm). Bei Freischnitten > 60 mm gilt Detail ① in Tabelle 8.4.	$\Delta\sigma$ wird mit der Längsspannung im Grundmaterial berechnet. Längsnaht rundum den Freischnitt geschweißt. Die quer laufende Stumpfnah sollte nach Tabelle 8.3 nachgewiesen werden.

Tabelle 8.2 – Geschweißte zusammengesetzte Querschnitte (fortgesetzt)

Table 8.2 – Welded built-up sections (continued)

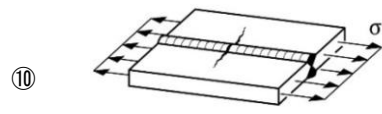
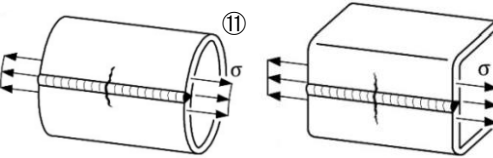
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
125		$\nabla \bar{X}$	⑩: Stumpfnah, beidseitig in Lastrichtung blecheben geschliffen, ohne Ansatzstellen	Umfang der ZFP nach EN 1090-2: 100%
112		∇X	Wie zuvor, ohne Schleifen	
90			Wie zuvor, mit Ansatzstellen	
140			⑪: Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnah in Hohlprofilen ohne Ansatzstellen nach EN 10210 oder EN 10219	Wanddicke $t \leq 12,5 \text{ mm}$
125			Mit Automaten oder voll mechanisiert geschweißte Längsnah in Hohlprofilen mit Ansatzstellen	Wanddicke $t > 12,5 \text{ mm}$
90				

Tabelle 8.3 – Stumpfstoße

Table 8.3 – Transverse butt welds

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
125			kerbfrei bearbeiteter Stumpfstoß	kerbfrei bearbeitete Stumpfnähte in Blechen gleicher Dicke Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen
90			Stumpfstoß mit Schweißnahtüberhöhung $\leq 10\%$	Schweißnahtanstiegswinkel $\geq 150^\circ$ Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen
80			Stumpfstoß mit Schweißnahtüberhöhung $\leq 20\%$	Schweißnahtanstiegswinkel $\geq 110^\circ$ Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen
90			Vollstöße von Walzprofilen mit Freischnitt, Nahtübergänge kerbfrei bearbeitet	kerbfrei bearbeitete Stumpfnähte in Blechen gleicher Dicke
80			Wie oben mit Schweißnahtüberhöhung $\leq 10\%$	Schweißnahtanstiegswinkel $\geq 150^\circ$ Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen Versatz $\leq 5\%$ der Plattendicke
80			Stumpfstoß: einseitig geschweißt mit verbleibender Schweißbadsicherung	Die Heftnaht muss innerhalb der späteren Stumpfnähte liegen. Der Abstand e_p muss so gewählt werden, dass kein Aufschmelzen der Blechkanten eintreten kann.
50			Wie oben ohne Anforderung an die Heftnähte	/

Tabelle 8.3 – Stumpfstoße (fortgesetzt)

Table 8.3 – Transverse butt welds (continued)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
71			Stumpfstoße einseitig geschweißt	Inspektion der Wurzellage durch geeignete Prüfverfahren
36				/
112			kerbfrei bearbeitete Stumpfstoße mit Geometrieänderung, Übergang 1:4,	Die Nennspannung wird im dünneren Blech ermittelt
80			Stumpfstoß mit Schweißnahtüberhöhung $\le 10\%$	Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen
71			Stumpfstoße mit Schweißbadsicherung und Geometrieübergang 1:4	Die Heftnaht muss innerhalb der späteren Stumpfnah liegen. Der Abstand e_p muss so gewählt werden, dass kein Aufschmelzen der Blechkanten eintreten kann.
50			Wie oben, aber ohne Anforderung an die Heftnähte	/
71			Stumpfstoße mit Blechen unterschiedlicher Dicke und ohne Exzentrizität	Die Nennspannung wird im dünneren Blech ermittelt
90			Mehrteiliger, quer zur Krafrichtung laufender Stumpfstoß	Beim Schweißen des Stumpfstoßes darf die Stirnfugennaht nicht aufgeschmolzen werden Schweißnahtanstiegswinkel $\ge 150^\circ$
			Mehrteiliger, quer zur Krafrichtung laufender Stumpfstoß mit Dickenübergang 1:4	Wie oben mit kerbfrei bearbeiteten Nahtübergängen. Die Nennspannung wird im dünneren Blech ermittelt

Blechkeneinfluss für $t \geq 25$ mm muss für alle Kerbdetails berücksichtigt werden mit Erhöhungsfaktor $k_s = (25/t)^{0,2}$, dabei ist t die Dicke des dünneren Blechs.

Tabelle 8.4 – Angeschweißte Anschlüsse und Steifen

Table 8.4 – Welded attachments and stiffeners

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
71			<p>Längssteife auf Trägern oder Blechen. Längssteife auf gekrümmten Blechen. Längssteife mit Anfasung.</p>	<p>Umlaufende Schweißnaht. Die Nennspannung wird im Grundblech unter Vernachlässigung der Steife berechnet.</p>
80		<p>(für die Endnaht)</p> <p>(für die Flanken-nahte)</p>	<p>Längssteife mit Ausrundung und verstärkter Endnaht</p>	<p>$r > 150 \text{ mm}$ Endnaht voll durchgeschweißt und kerbfrei bearbeitet</p>
56			<p>Längssteife am Bauteilrand Angefaste Längssteife am Bauteilrand</p>	<p>Umlaufende Schweißnaht. Die Nennspannung wird im Grundblech unter Vernachlässigung der Steife berechnet. Die Blechdicke der Steife darf dünner sein als die Grundblechdicke</p>
71		<p>(für die Endnaht)</p> <p>(für die Flanken-nahte)</p>	<p>Längssteife am Bauteilrand mit Radius und kerbfrei bearbeitet</p>	<p>$r > 150 \text{ mm}$ Endnaht voll durchgeschweißt und kerbfrei bearbeitet Die Blechdicke der Steife darf dünner sein als die Grundblechdicke</p>

Tabelle 8.4 – Angeschweißte Anschlüsse und Steifen (fortgesetzt)

Table 8.4 – Welded attachments and stiffeners (continued)

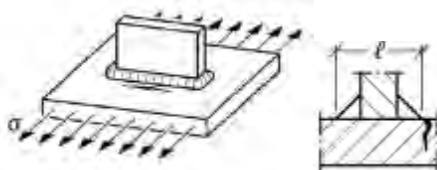


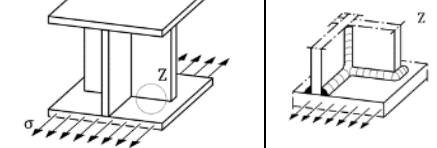
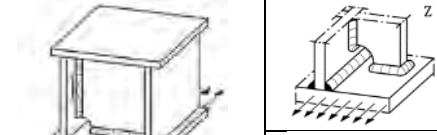
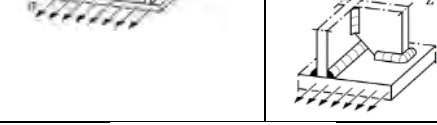
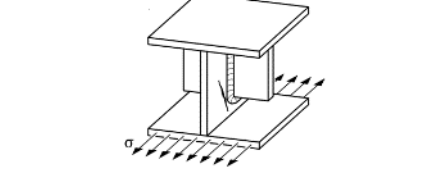
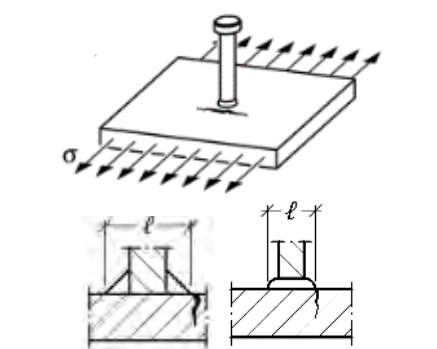

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderung
80 ($\ell \leq 50$ mm) 71 ($50 < \ell \leq$ 80 mm)			Quersteife auf Blechen	Die Nennspannung wird im Grundblech bzw. im Träger unter Vernachlässigung der Steife berechnet.
			eingepasste Quersteifen in gewalzten Trägern	
			eingepasste Quersteifen in geschweißten Trägern, überschweißen der Längsnaht	
			Quersteife mit Aussparung, Umschweißung an Flansch und Steg	
			Quersteife mit Aussparung ohne Umschweißung	
			Halbhohe Quersteifen	Die einwirkende Spannung muss mit Hilfe der maximalen Hauptspannung
80			Umschweißte oder hubgeschweißte Butzen oder Dübel	$\ell \leq 50$ mm

Tabelle 8.5 – Geschweißte Stöße

Table 8.5 – Load carrying welded joints

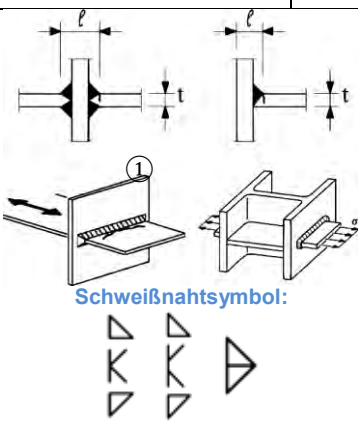
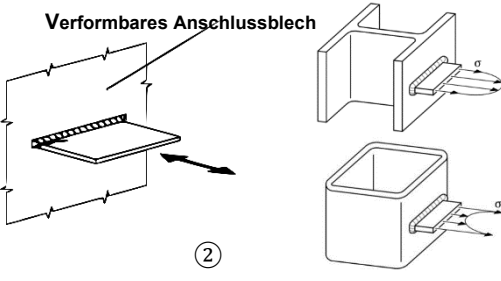

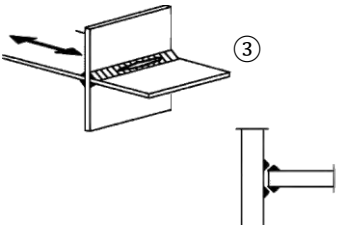

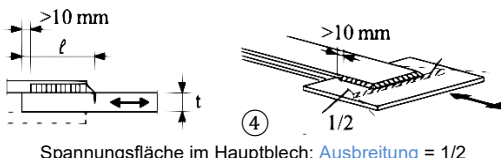

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Schweißsymbol	Beschreibung	Anforderungen
71	$l \leq 80$	alle t	 <p>Schweißnahtsymbol:</p>	Kreuz- und T-Stöße: ①: Riss am Schweißnahtübergang an voll durchgeschweißten Stumpfnähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten.	- Gleichmäßige Lasteinleitung in das Zwischenbauteil und gleichmäßige Spannungsverteilung am Schweißnahtübergang. Ansonsten ist $\Delta\sigma$ als modifizierten Nennspannungsschwingbreite zu ermitteln. (Siehe Detail ②) - Bei <u>nicht</u> durchgeschweißten Nähten ist zusätzlich ein Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel (Detail ③) erforderlich. - Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.
63	$80 < l \leq 100$	alle t			
56	$100 < l \leq 120$	alle t			
56	$l > 120$	$t \leq 20$			
50	$120 < l \leq 200$	$t > 20$			
	$l > 200$	$20 < t \leq 30$			
45	$200 < l \leq 300$	$t > 30$			
	$l > 300$	$30 < t \leq 50$			
40	$l > 300$	$t > 50$			
Wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	Verformbares Anschlussblech 			②: Riss am Schweißnahtübergang, ausgehend von der Kante des Anschlussbleches, mit Spannungskonzentrationen an den Schweißnahtenden infolge Blechverformungen.	- <u>Nicht</u> gleichmäßige Lasteinleitung in das Zwischenbauteil und ungleichmäßige Spannungsverteilung am Schweißnahtübergang. $\Delta\sigma$ ist mit einer <u>modifizierten</u> Nennspannungsschwingbreite zu ermitteln. - Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.
36				③: Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten T-Stößen, Kehlnähten oder in T-Stößen nach Bild 4.6 in EN 1993-1-8:2005	- Es sind 2 Ermüdungsnachweise erforderlich: zum einen der Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen nach Abschnitt 5 (DIN EN 1993-1-9:2010) mit Kerbgruppe 36 für σ_w und Kerbgruppe 80 ($m = 5$) für τ_w , zum anderen der Nachweis des Nahtüberganges mit Bestimmung von $\Delta\sigma$ in den belasteten Blechen (Detail ①). - Die Ausmittigkeit der belasteten Bleche muss $\leq 15\%$ der Dicke des Zwischenblechs sein.
Wie Kerbfall 1 in Tabelle 8.5	 <p>Spannungsfläche im Hauptblech: Ausbreitung = 1/2</p>			Anschlüsse mit überlappenden Bauteilen: ④ Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung – Versagen am Schweißnahtübergang des Grundblechs.	- Berechnung von $\Delta\sigma$ im Hauptblech mit der in der Skizze gezeigten Fläche. - Die Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein. - Ein Schubanriss in der Schweißnaht ist mit Kerbfall ⑧ zu überprüfen.

Tabelle 8.5 – Geschweißte Stöße (fortgesetzt)

Table 8.5 – Load carrying welded joints (continued)

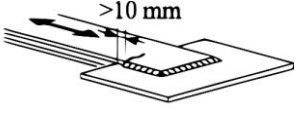

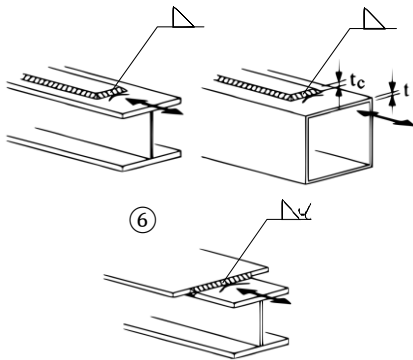
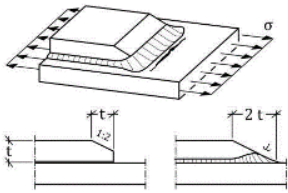

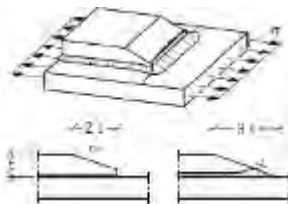

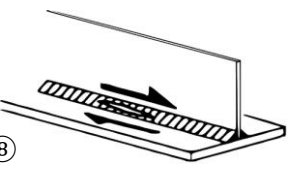

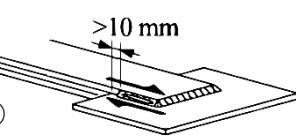

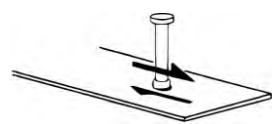

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Schweißsymbol	Beschreibung	Anforderungen
45				<p>⑤: Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.</p> <p>Hinweis: Der Kerbfall deckt auch Laschenverbindungen mit ausschließlich Längsnähten (ohne Stirnnaht) ab.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Berechnung von $\Delta\sigma$ in den überlappenden Laschen. - Die Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein. - Ein Schubanriss in der Schweißnaht ist mit Kerbfall ⑧ zu überprüfen.
56*	$t_c < t$	$t_c \geq t$		<p>Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Blechträgern:</p> <p>⑥: Endbereiche von einlagig oder mehrlagig aufgeschweißten Gurtplatten mit und ohne Stirnnaht.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Die minimale Lamellenlänge beträgt 300 mm. Für kürzere Lamellen siehe Abstufung für Detail ①. - Wenn die Lamellen breiter sind als der Flansch, ist eine Stirnnaht, die sorgfältig ausgeschliffen wird, um Einbrandkerben zu entfernen, erforderlich.
50	$t \leq 20$	-			
45	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$			
40	$30 < t \leq 50$	$20 < l \leq 30$			
40	$t > 50$	$30 < l \leq 50$			
36	-	$t > 50$			
80	<p>⑦a</p> 			<p>Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Trägern, Steigung der Stirnnaht und Lamelle 1:2</p>	<p>Stirnnaht ist blechen zu bearbeiten, Nahtübergang kerbfrei bearbeitet, Heftnähte an Stirnseite vermeiden</p>
80				<p>Gurtlamellen auf Walzprofilen und geschweißten Trägern, Steigung der Stirnnaht und Lamelle 1:3</p>	<p>Stirnnaht ist blechen zu bearbeiten, Nahtübergang kerbfrei bearbeitet, Heftnähte an Stirnseite vermeiden</p>
90 (m = 5)				<p>⑧: Durchgehende Kehlnähte, die einen Schubfluss übertragen, wie z. B. Halskehlnähte zwischen Stegblech und Flansch bei geschweißten Blechträgern.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - $\Delta\tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen zu berechnen. - Der Interaktionsnachweis nach Abschnitt 8 (DIN EN 1993-1-9:2010) ist mit $\Delta\tau = 80$ (m = 5) zu führen.
80 (m = 5)				<p>⑨: Mit Kehlnähten geschweißte Laschenverbindung.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - $\Delta\tau$ ist auf die Schweißnahtdicke bezogen unter Berücksichtigung der Gesamtlänge der Schweißnaht zu berechnen. - Schweißnahtenden müssen ≥ 10 mm vom Blechende entfernt sein.
siehe EN 1992-4 90 (m = 8)	<p>⑩</p> 			<p>Schweißnähte unter Querkraftbeanspruchung:</p> <p>⑩: Kopfbolzendübel in Verbundwirkung</p>	<ul style="list-style-type: none"> - $\Delta\tau$ wird am Nennquerschnitt des Dübels ermittelt.

Tabelle 8.5 – Geschweißte Stöße (fortgesetzt)

Table 8.5 – Load carrying welded joints (continued)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Schweißsymbol	Beschreibung	Anforderungen
71		Y	Ringflansanschluss mit zu 80 % durchgeschweißten Stumpf-nähten.	(11) und (12): $\Delta\sigma$ wird am Rohrquerschnitt berechnet. (11): Der Schweißnahtübergang ist zu überschleifen. (12): Zusätzlich ist ein Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Kerbfall 36 und Spannungen σ_w bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt (Abschnitt 5 - DIN EN 1993-1-9: 2010) zu führen.
40		△	Ringflansanschluss mit Kehlnähten.	- Insbesondere bei dünnen Flanschen wird eine Nachweisführung mit dem Strukturspannungskonzept empfohlen.
80	<p>$l \leq 50\text{mm}$ $h \leq 300\text{mm}$</p>		<u>Stirplattenverbindungen mit überstehender Stirnplatte, doppelsymmetrischem I-Profil und 3 Schraubenreihen:</u> (13): Riss am Schweißnahtübergang in voll durchgeschweißten Stumpf-nähten und allen nicht durchgeschweißten Nähten am Zugflansch (Unterflansch)	(13): $\Delta\sigma$ ist mit korrigierten Nennspannungen ^{a)} zu ermitteln. (14): Es ist zusätzlich Detail 8 Tabelle 8.5 nachzuweisen.
40	<p>$h \leq 300\text{mm}$</p>		(14): Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten Nähten oder Kehlnähten am Zugflansch (Unterflansch)	(14): Wurzelriss bei nicht voll durchgeschweißten Stumpfnaht am Steg und Druckflansch (Oberflansch). Es dürfen nur vorgespannte Schrauben nach EN 1993-1-8 und EN 1090-2 verwendet werden. Der Nachweis der Schraube erfolgt nach Detail 14 Tabelle 8.1. Die Positionierung der unteren zwei Schraubenreihen erfolgt möglichst nah am Zugflansch (Unterflansch).

^{a)} Konservative Abschätzung: $k_f = 2,0$

Tabelle 8.6 – Hohlprofile ($t \leq 12,5$ mm)

Table 8.6 – Hollow sections ($t \leq 12,5$ mm)

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
71	<p>①</p>	×	<p>①: Ringflanschanchluss mit zusammengedrücktem Endquerschnitt, Stumpfnah (X-Naht).</p>	<p>- $\Delta\sigma$ ist am Rohrquerschnitt zu berechnen. - Bei der Umformung des Endquerschnitts der Rohralbzeuge ist eine ausreichende Zähigkeit des Grundmaterials sicherzustellen. Eine Vorschädigung (Rissbildung) muss ausgeschlossen werden.</p>
71	<p>②</p>		<p>②: Rohr-Blech-Anschluss, Rohr geschlitzt und an das Blech geschweißt, Loch am Schlitzende.</p>	<p>- $\Delta\sigma$ ist am Rohrquerschnitt zu berechnen. Schubriss in der Schweißnaht sind nach Tabelle 8.5, Kerbfall ⑧ nachzuweisen.</p>
63	<p>③</p>			
71	<p>④</p>	✓	<p>Quernähte: ③: Stöße von Rundhohlprofilen mit durchgeschweißten Stumpfnähten.</p>	<p>- Nahtüberhöhung $\leq 10\%$ der Schweißnahtdicke mit verlaufendem Übergang in das Grundmaterial. - Wanddicken größer $t > 12,5$ mm sind mit abgedeckt. - Konstruktionsdetails mit $t > 8$ mm dürfen 2 Kerbfallkategorien höher eingestuft werden.</p>
56	<p>⑤</p>	✓	<p>Quernähte: ④: Stöße von Rechteckhohlprofilen mit durchgeschweißten Stumpfnähten.</p>	<p>- Nahtüberhöhung $\leq 10\%$ der Schweißnahtdicke mit verlaufendem Übergang in das Grundmaterial. - Konstruktionsdetails mit $t > 8$ mm dürfen 2 Kerbfallkategorien höher eingestuft werden.</p>
71	<p>⑥</p>	△	<p>Nicht tragende Schweißnähte: ⑤: Mit Kehlnähten an ein anderes Bauteil angeschweißte runde oder rechteckige Hohlprofile.</p>	<p>- Nicht tragende Schweißnähte. - Querschnittsbreite parallel zur Spannungsrichtung $l \leq 100$ mm. - Für andere Fälle siehe Tabelle 8.4.</p>
<p>Siehe Kerbdetail Quersteife (Detail 6 / Tabelle 8.4)</p>				

Tabelle 8.6 – Hohlprofile ($t \leq 12,5$ mm) (fortgesetzt)

Table 8.6 – Hollow sections ($t \leq 12,5$ mm) (continued)

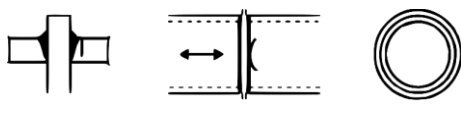
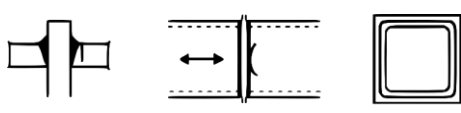
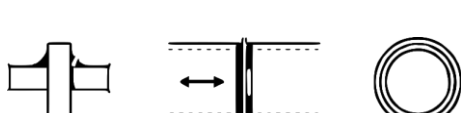

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
50		✓	Tragende Schweißnähte: ⑥: Kopfplattenstoß von Rundhohlprofilen mit durchgeschweißten Nähten.	- Tragende Schweißnähte. - Konstruktionsdetails mit Wanddicken $t > 8$ mm dürfen eine Kerbfallkategorie höher eingestuft werden.
45		✓	⑦: Kopfplattenstoß von Rechteckhohlprofilen mit durchgeschweißten Nähten.	- Tragende Schweißnähte. - Konstruktionsdetails mit Wanddicken $t > 8$ mm dürfen eine Kerbfallkategorie höher eingestuft werden.
40		△	⑧: Kopfplattenstoß von Rundhohlprofilen mit Kehlnähten.	- Tragende Schweißnähte. - Wanddicken $t \leq 8$ mm. - Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen σ_w bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt (Abschnitt 5 - DIN EN 1993-1-9:2010).
36		△	⑨: Kopfplattenstoß von Rechteckhohlprofilen mit Kehlnähten.	- Tragende Schweißnähte. - Wanddicken $t \leq 8$ mm. - Nachweis gegen Riss der Schweißnahtwurzel mit Spannungen σ_w bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt (Abschnitt 5 - DIN EN 1993-1-9:2010).

Tabelle 8.7 – Geschweißte Knoten von Fachwerkträgern

Table 8.7 – Lattice girder node joints

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
80 m=5			①: K- und N-Knoten mit Rundhohlprofilen und Spalt	<ul style="list-style-type: none"> $t_i \leq 8 \text{ mm}$ $\frac{d_0}{t_0} \leq 25$ bzw. $\frac{b_0}{t_0} \leq 25$ $0,25 \leq \frac{d_i}{d_0} \leq 1$ bzw. $0,4 \leq \frac{b_i}{b_0} \leq 1$ $d_0 \leq 300 \text{ mm}$ bzw. $b_0 \leq 200 \text{ mm}$ $-0,5 d_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 d_0$ bzw. $-0,5 h_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25 h_0$ $e_{o/p} \leq 0,02 d_0$ bzw. $e_{o/p} \leq 0,02 b_0$
40 m=5				
63 m=5			②: K- und N-Knoten mit Rechteckprofilen und Spalt	①: <ul style="list-style-type: none"> $35^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ ② bis ④: <ul style="list-style-type: none"> $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ ②: <ul style="list-style-type: none"> $0,5(b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_i)$ $g \geq 2 t_0$ ③ und ④: <ul style="list-style-type: none"> $0,3 \leq \frac{q}{p} \leq 1$
36 m=5				
71 m=5			③: K-Knoten mit Rechteck- oder Rundhohlprofilen und Überlappung	
56 m=5				
80 m=5			④: N-Knoten mit Rechteck- oder Rundhohlprofilen und Überlappung	
50 m=5				
Details ① bis ④: <ul style="list-style-type: none"> Es sind getrennte Nachweise für Gurt und Diagonalen zu führen. Bei Zwischenwerten von t_0/t_i ist zwischen den Kerbfallklassen linear zu interpolieren. $e_{o/p}$: Ausmittigkeit rechtwinklig zur Verbandsebene 				

Tabelle 8.8 – Orthotrope Platten mit Hohlrippen

Table 8.8 – Orthotropic decks with closed stringers

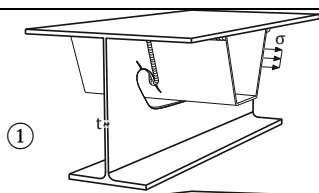
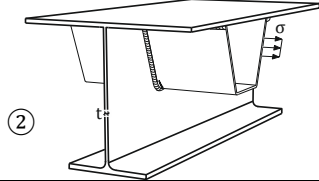
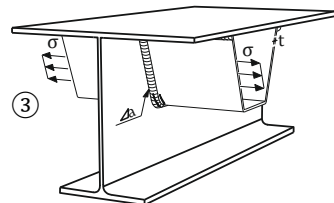
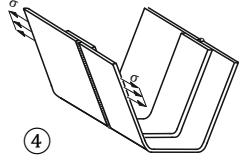
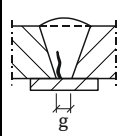
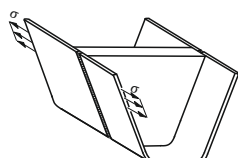
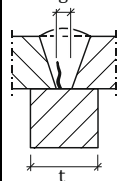


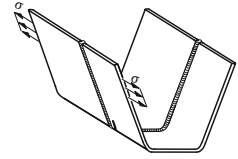


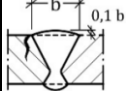

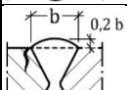
Kerbfall	Konstruktionsdetail		Symbol	Beschreibung	Anforderungen			
80	$t \leq 12 \text{ mm}$	 <p>①</p>	▽	Durchgehende Längsrippe mit oder ohne Ausschnitt im Querträger.	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.			
71	$t > 12 \text{ mm}$					 <p>②</p>		
56		 <p>③</p>	▽▽ /	Anschluss der Längsrippe an den Querträger	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. Die Ausmittigkeit der Rippen muss $\leq 15\%$ der Dicke des Querträgerstegs sein.			
40			▽		Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. Die Ausmittigkeit der Rippen muss $\leq 15\%$ der Dicke des Querträgerstegs sein. $a \geq t$			
71	$g > 6 \text{ mm}$	 <p>④</p>		Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah und Badsicherung	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. Die Haftnaht der Badsicherung ist nur innerhalb der späteren Stumpfnah zulässig Schweißnahtanstiegswinkel $\geq 110^\circ$ Blechränder sind blechen in Lastrichtung zu schleifen			
63	$4 \leq g \leq 6 \text{ mm}$							
36	$0 \leq g \leq 4 \text{ mm}$							
112		 <p>④</p>		 M  M	Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah und Siegelplatte	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. Die Haftnaht der Badsicherung ist nur innerhalb der späteren Stumpfnah zulässig. Schweißnahtanstiegswinkel $\geq 150^\circ$ Blechränder sind blechen in Lastrichtung zu schleifen. Umfang der ZFP nach EN 1090-2: 100% $g \geq 10 \text{ mm}$ $t \geq 20 \text{ mm}$		
112		 <p>⑤</p>		 X K	Rippenstoß mit voll durchgeschweißter Stumpfnah: kerbfrei bearbeiteter Stumpfstoß	Der Nachweis ist mit der Längsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. kerbfrei bearbeitete Stumpfnähte in Blechen gleicher Dicke. Blechränder sind blechen in Lastrichtung zu schleifen		
90						 X K	Stumpfstoß mit Schweißnaht-überhöhung $\leq 10\%$	Schweißnahtanstiegswinkel $\geq 150^\circ$ Blechränder sind blechen in Lastrichtung zu schleifen
80								Stumpfstoß mit Schweißnaht-überhöhung $\leq 20\%$

Tabelle 8.8 – Orthotrope Platten mit Hohlrippen (fortgesetzt)

Table 8.8 – Orthotropic decks with closed stringers (continued)

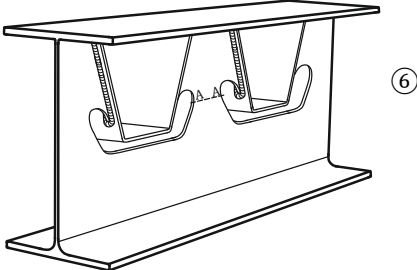
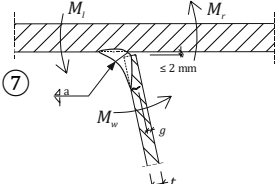

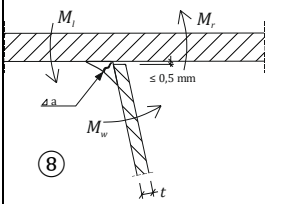
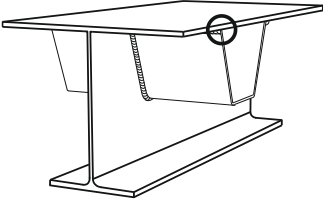

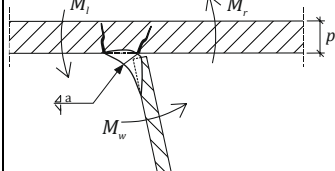

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen	
71 112		-	Kritischer Schnitt A-A im Querträgersteg mit Ausschnitten.	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite im kritischen Schnitt A-A unter Berücksichtigung von Vierendeel-Effekten zu führen. Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite nach EN 1993-2, 9.4.2.2(3) zu führen.	
50			Naht zwischen Deckblech und trapez- oder V-förmiger Rippe: Versagen in der Rippe bei einer versenkten Naht	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite infolge Blechbiegung in der Rippe zu führen: $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_w}{W_w}$ W_w ist mit t zu berechnen $a \geq t$ $g < 2\text{ mm}$	
63				Wurzelversagen in der Kehlnaht oder nicht voll durchgeschweißten Naht, wenn nicht durch Kerbfall 7 abgedeckt	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite infolge Blechbiegung in der Rippe zu führen: $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_w}{W_w}$ W_w ist mit a zu berechnen $a \geq t$ Die Enden der Rippen sind blecheben zu schleifen, sodass sie bündig ($\le 0,5\text{ mm}$) am Deckblech anliegen.
125			Versagen im Deckblech	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite im Deckblech zu führen: $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_{I/R}}{W_p}$ W_p ist mit p zu berechnen	

Tabelle 8.9 – Orthotrope Platten mit offenen Rippen

Table 8.9 – Orthotropic decks with open stringers

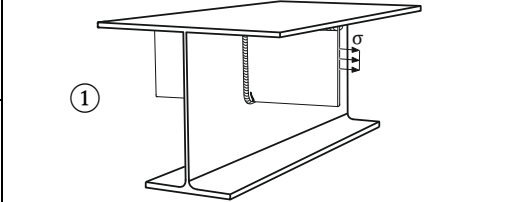

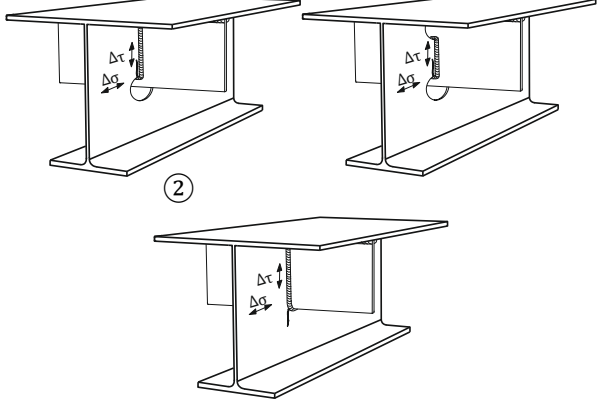
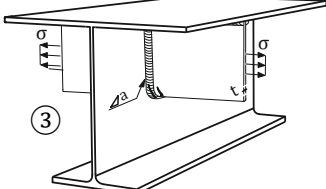
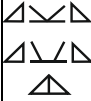
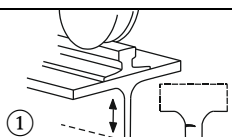
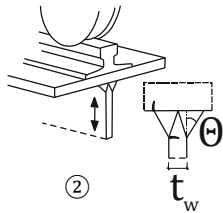
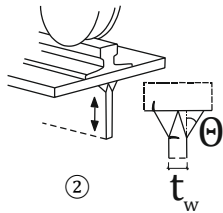
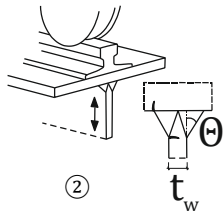
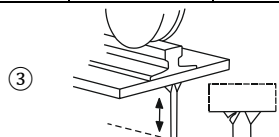
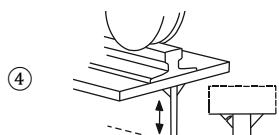
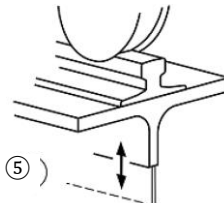
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Symbol	Beschreibung	Anforderungen
80 71	$t \leq 12mm$ $t > 12mm$ 		Anschluss einer durchgehenden Längsrippe an den Querträger	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen.
56			Anschluss einer durchgehenden Längsrippe an den Querträger mit und ohne Freischnitt	Der Nachweis ist mit der Kombination der Spannungsschwingbreite $\Delta\tau$ infolge Querkraft und der Spannungsschwingbreite infolge Biegung $\Delta\sigma$ im Querträgersteg mit einer äquivalenten Spannungsschwingbreite zu führen: $\Delta\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\Delta\sigma + \sqrt{\Delta\sigma^2 + 4\Delta\tau^2} \right)$ mit $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_s}{W_{net,s}}$ und $\Delta\tau = \frac{\Delta V_s}{A_{w,net,s}}$ Spannungsschwingspiele zwischen den Längsrippen sind ebenfalls entsprechend EN 1993-2 nachzuweisen.
36			Anschluss einer Längsrippe an den Querträger.	Der Nachweis ist mit der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in der Rippe zu führen. $a \geq 0,5t$
Der Hintergrund der Details und der in Abschnitt 6.9.4 beschriebene, mögliche Übertragungsfehler muss zukünftig noch abschließend geklärt werden.				

Tabelle 8.10 - Obergurt-Stegblech Anschlüsse von Kranbahnträgern

Table 8.10 - Top flange to web junction of runway beams

Kerbfall	Konstruktionsdetail		Symbol	Beschreibung	Anforderungen
160			nicht geschweißt	Walzquerschnitt mit lastverteilendem Oberflansch mit Radlasteinleitung	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung im Steg nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7
140	$t_w \leq 30mm$	$5^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$		$\nabla \nabla \nabla$ DHV-Naht (K-Naht) mit Doppelkehlnaht (symmetrisch)	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung im Steg nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7 – Durchgeschweißt – Wurzel ausgeräumt – Nahtübergänge kerbfrei; erforderlichenfalls bearbeitet
125	$30 < t_w \leq 50mm$				
100	$50 < t_w \leq 100mm$				
112	$t_w \leq 30mm$	$15^\circ < \theta \leq 45^\circ$		$\nabla \nabla \nabla$ DHV-Naht (K-Naht) mit Doppelkehlnaht (symmetrisch)	
100	$30 < t_w \leq 50mm$				
80	$50 < t_w \leq 100mm$				
90	$t_w \leq 30mm$	$5^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$		$\nabla \nabla \nabla$ HV-Naht mit Kehlnaht und gegengeschweißter Kapplage	
80	$30 < t_w \leq 50mm$				
71	$50 < t_w \leq 100mm$				
50			$\nabla \nabla \nabla$	nicht durchgeschweißter T-Stoß mit Radlasteinleitung mit $a/t \leq 0,7$ a = Einzelnahtdicke t = Stegdicke	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung in der Schweißnaht nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7
50			∇	T-Stoß mit Doppelkehlnaht und Radlasteinleitung mit $a/t \leq 0,7$ a = Einzelnahtdicke t = Stegdicke	Hinweis: Für Nähte mit $a/t > 0,7$ kann auch Versagen am Schweißnahtübergang auftreten. Für diese Nähte ist die Spannungsschwingbreite im Steg zu berechnen.
100			$\nabla \nabla \nabla$	durchgeschweißter Anschluss eines Gurtprofils an den Steg mit Radlasteinleitung	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung im Steg nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7
50			$\nabla \nabla \nabla$	wie vor, jedoch nicht durchgeschweißt mit $a/t \leq 0,7$ a = Einzelnahtdicke t = Stegdicke	Schwingbreite der lokalen Druckspannungen infolge Radlasteinleitung in der Schweißnaht nach DIN EN 1993-6, Abs. 5.7
50			∇	wie vor, jedoch mit Doppelkehlnaht mit $a/t \leq 0,7$ a = Einzelnahtdicke t = Stegdicke	Hinweis: Für Nähte mit $a/t > 0,7$ kann auch Versagen am Schweißnahtübergang auftreten. Für diese Nähte ist die Spannungsschwingbreite im Steg zu berechnen.

23 Anhang B – Leitfaden zur Evaluierung von Ermüdungsversuchen

Annex B – Guide to the evaluation of fatigue tests

Kurzfassung

Die Erkenntnisse im Bereich der Versuchsdurchführung und Dokumentation, sowie der statistischen Auswertung von Ermüdungsversuchen des Projektes werden in Form dieses Leitfadens festgehalten, so dass künftig eine einheitliche Vorgehensweise bei der Durchführung und Erfassung von Versuchen und der daraus resultierenden Bewertung hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit ermöglicht wird.

Abstract

The findings of this project in the field of test execution and documentation as well as the statistical evaluation of fatigue tests will be recorded in this guideline, so that in future a uniform procedure will be possible for the execution and documentation of tests and the resulting evaluation with regard to fatigue strength.

23.1 Allgemeines

General

Dieser Leitfaden befasst sich mit Empfehlungen zur Durchführung und Dokumentation von Ermüdungsversuchen, sowie der Erfassung und Auswertung von Versuchsdaten. Es werden die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Grundlagen der Ermüdung vorausgesetzt.

23.2 Ermüdungsversuchsplanung -durchführung

Fatigue test planning and conduction

Für die Durchführung von Ermüdungsversuchen ist eine sorgfältige Planung wesentlich. Grundsätzlich sollten vorab die Ziele (bspw. Ableitung einer Bemessungswöhlerlinie für ein konkretes Konstruktionsdetail) und Randbedingungen der experimentellen Untersuchungen klar definiert werden. Auf dieser Grundlage ist ein geeigneter Probekörpertyp (Großbauteil, Ersatz- oder Kleinteilprüfkörper) zu wählen. Im Rahmen einer Voruntersuchung, ggf. mittels numerischer Methoden, sollte der Prüfkörper derart dimensioniert sein, dass die zu untersuchende Kerbe maßgebend ist. Insbesondere bei komplexeren Großbauteilen kann meist nicht nur eine potentielle Versagensstelle im Versuch maßgebend werden. Grundsätzlich wird empfohlen Versuche an gleichen oder vergleichbaren Konstruktionsdetails aus der Literatur mit in die Planungsphase einzubeziehen. Als konkrete Anlaufstelle kann die vorliegende Datensammlung und Ausarbeitung der vorangegangenen Kapitel empfohlen werden. Hierbei wurden zudem grundlegende Besonderheiten der jeweiligen Kerbdetails beschrieben.

Weiterhin sind bei der Versuchsplanung die zahlreichen Einflüsse (Geometrie, Material, Schweißnahteigenschaften, Fertigung, Beanspruchung) auf die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils zu beachten, auf die in Abschnitt 23.3 näher eingegangen wird.

Bereits bei der Probekörperherstellung ist auf die Dokumentation wesentlicher Einflussgrößen (siehe auch Abschnitt 23.3), wie Kontrolle der einzelnen Halbzeuge, Schweißnahtvorbereitung, Schweißung und eventuelle Nacharbeit zu achten. Bei einer etwaigen anschließenden Ausarbeitung von Kleinteilproben ist auf eine lückenlose Zuordenbarkeit der einzelnen Probekörper zu achten.

Vor der Versuchsdurchführung sind die einzelnen Proben umfassend zu charakterisieren. Hierzu zählen u.a. Angaben zur Geometrie, zu den auftretenden Imperfektionen und eine Bewertung der Schweißnahtgüte. Die nominellen und charakteristischen Eigenschaften der Prüfkörper und die Informationen der Versuchsdurchführung sollten möglichst ausführlich dokumentiert werden, siehe Abschnitt 23.3.

Da Ermüdungsversuchsdaten stark streuen können, ist für eine große Aussagekraft der Versuchsserie eine ausreichende Anzahl an Prüfkörpern vorzusehen. Um die Ermüdungsfestigkeit eines Details in verschiedenen Zeitfestigkeitsbereichen zu untersuchen, sollten verschiedene Belastungshorizonte gewählt werden. Hierbei empfiehlt sich, mit einem hohen Belastungshorizont zu beginnen. Gängiger Weise werden Ermüdungsversuche an Schweißkerbdetails mit konstanten Amplituden im Zugschwellbereich durchgeführt ($R = 0,1$ oder $R = 0,5$). Vor Beginn der Versuche ist das Versagenskriterium festzulegen, vgl. Tabelle 23-1.

Tabelle 23-1: Versagenskriterien

Table 23-1: Failure criterion

Bezeichnung	Versagenskriterium: Anzahl der Lastspiele bei
N1	15% Dehnungsänderung an der Stelle der Rissinitiation
N2	Detektion eines Risses
N3	Riss durch die Dicke
N4	komplettem Verlust der Steifigkeit
N5	einem anderen Kriterium als N1 – N4, Kriterium eindeutig definieren!
N6	Feststellung eines Durchläufers (kein Versagen)

23.3 Dokumentation von Ermüdungsversuchen

Die Dokumentation der Ermüdungsversuche sollte sorgfältig erfolgen. Tabelle 23-2 enthält die zu dokumentierenden Informationen einer Ermüdungsversuchsserie. Versuchsergebnisse sind bestenfalls tabellarisch darzustellen.

Erfolgt die Datenerfassung über die Weboberfläche [63], so werden in Abhängigkeit vom entsprechenden Kerbdetail bereits eine Vielzahl an dokumentationsrelevanten Daten abgefragt.

Tabelle 23-2: Zu dokumentierende Informationen einer Ermüdungsversuchsserie

Table 23-2: Information of a fatigue test series to be documented

Kategorie	Enthaltene Informationen
Allgemein	Name des Serie, Beschreibung des Konstruktionsdetails, Bauteilmaßstab
Belastung	Art der Belastung, ob konstante oder variable Amplituden aufgebracht wurden, Frequenzbereich, Ort der berechneten Nennspannung
Material	Stahlgüte, Streckgrenze, Zugfestigkeit
Schweißnähte	Schweißnahtform, Symbol nach. to [56], Anzahl der Lagen, Schweißprozess nach [57], Vorbehandlung, Nachbehandlung, Schweißfolge, ob die Schweißnaht durchgängig ist, Füllmaterial, Streckgrenze des Füllmaterials, Zugfestigkeit des Füllmaterials, Bewertungsgruppe nach [19], Schweißposition nach [58]
Umwelteinflüsse	Temperatur, Luftfeuchtigkeit, korrosive Bedingungen, radioaktive Bedingungen
Detailspezifische Informationen	Imperfektionen, Geometrie der Prüfkörper, Besonderheiten
Ermüdungsversuch	Spannungsverhältnis, Nennspannungsschwingbreite, Zyklenzahl, ob es sich um einen Durchläufer handelt, Versagensort

23.4 Erfassung von Ermüdungsversuchsdaten anhand Literatur

Wenn Ermüdungsversuche nicht selbst durchgeführt wurden, sondern bereits vorhandene Daten ausgewertet werden sollen, muss die Erfassung der Versuchsdaten anhand der jeweiligen Primärquelle(n) erfolgen. Aus der Primärquelle bzw. den -Quellen werden alle relevanten Daten extrahiert, siehe Tabelle 23-2. Besonders wichtig ist die Kenntnis der Geometrie der Prüfkörper, der Ort der angegebenen Nennspannung, der aufgetragenen Nennspannungsschwingbreite, der Zyklenzahl, des Versagensorts und des Versagenskriteriums sowie jeglicher besonderer Eigenschaften, die einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben können.

23.5 Auswertung von Versuchsdaten

Anhand der selbst dokumentierten oder aus Primärquellen erfassten Daten kann eine Kerbfallableitung erfolgen. Mithilfe eines statistischen Intervalls wird der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ bei 2 Millionen Zyklen bestimmt. Hierzu gibt Abschnitt 3.5 ein Rechenbeispiel an. Dargestellt werden Ermüdungsversuchsergebnisse häufig im Wöhlerdiagramm, in dem die Versuchsauswertung ebenfalls illustriert werden kann, siehe beispielhaft Bild 23-1.

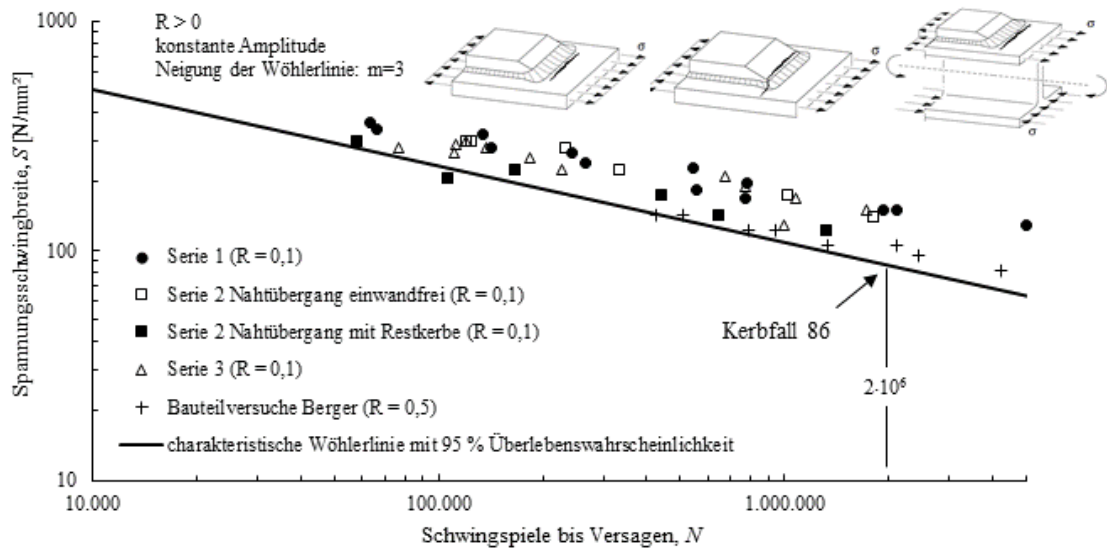






Bild 23-1: Darstellung der statistische Auswertung von Ermüdungsversuchen


Figure 23-1: Illustration of the statistical evaluation of fatigue tests

24 Anhang C – Datenbankanwendung


Annex C – Data base application

DETAILED INFORMATION OF ALL TEST SERIES


 Test Data  Search for fatigue Data  Evaluation fatigue Data  Insert fatigue Data

 **Overview**


An overview over the general information on all fatigue test series is presented here.

 **General Information**


Here you can find general information on the test series, including a description of the structural detail, scale of the specimens and source of test data.

 **Information on loading**

Here you can find general information on the test series, including a description of the structural detail, scale of the specimens and source of test data.

 **Information on material**

Relevant information on the steel grade of the test data is given here in terms of steel grade, yield and ultimate strength.

 **Information on welds**

Here you can find detailed information on the welding characteristics of the fatigue test data, including weld shape, process, pre and post treatment as well as material characteristics of fillers.

Bild 24-1: Unterseite „Test Data“ – 1. Abschnitt

Figure 24-1: Subpage "Test Data" - 1st section



Information on environmental conditions

If documented, this table informs about the environmental conditions during the testing, as temperature or information on corrosive conditions.



Information on previous evaluations

This page lists the evaluations of fatigue data, which have been documented in the predecessor commentary to EC 3-1-9.



Information on single tests

Here you can find the actual results of the fatigue tests in terms of stress range and number of cycles to failure.



Properties

List of detail specific properties.



Sources

Information of the sources of the fatigue data can be found on this page.

[Contact](#) [Impressum](#) [Background](#)

Bild 24-2: Unterseite „Test Data“ – 2. Abschnitt

Figure 24-2: Subpage "Test Data" – 2nd section

OVERVIEW					
Home Test Data Search for fatigue Data Evaluation fatigue Data Insert fatigue Data					
RECORDS PER SIDE: 50					PAGE: 1
ID of series	Description of structural detail	Detail according to EN 1993-1-9	Number of single tests n	Picture	More information
102000	Non Welded Joints	Table 8.1 - Detail 2	38		General Loading Material Welds Environmental Conditions Previous Evaluation Tests Properties
102001	Rolled beam	Table 8.1 - Detail 2	10		General Loading Material Welds Environmental Conditions Previous Evaluation Tests Properties

Bild 24-3: Unterseite „Overview“

Figure 24-3: Subpage "Overview "

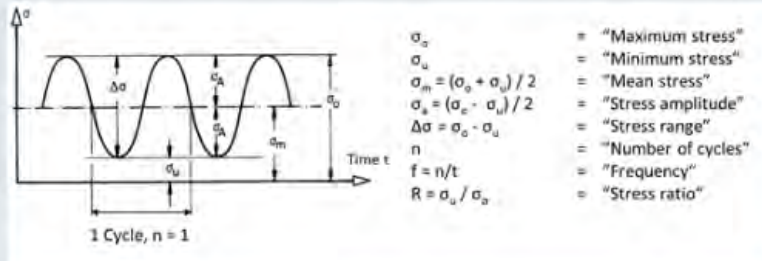
LIST OF SOURCES										
Home Test Data Search for fatigue Data Evaluation fatigue Data Insert fatigue Data										
RECORDS PER SIDE: 50										PAGE: 5
ID of source	Author	Title	Name of institution	City of institution	Country of institution	Series	Volume	Number	Pages	Publisher
201	Stallmeyer J.E., Munse W.H.	Behaviour of welded built up beams under repeated flexural loads	Department of Civil Engineering, University of Illinois	Urbana, Illinois	USA	Contract No.		CPR 11-7768		
202	Kouba N.G., Stallmeyer J.E.	The behaviour of stiffened beams under repeated loads, Struct. Res. Series No. 173, Univ. of Illinois, April 1959	Civil Engineering Studies	Urbana, Illinois	USA	Structural Research Series		173		
203	Fielding D.J., Toprac A. A.	Fatigue tests of slender-weld hybrid plate girders under combined bending and shear, M.S. Thesis, University of Texas, Austin, Texas, June 1968	Center for Highway Research, The University of Texas	Austin, Texas	USA	Research report		96-2		The Texas Highway Department

Bild 24-4: Unterseite „List of Sources“

Figure 24-4: Subpage "List of Sources"

Stress ratio [-]

This column states the stress ratio, which is defined by the ratio between minimum and maximum stress during the cyclic loading. In some cases, the stress range had to be calculated out of information given in the source.



Nominal stress range[MPa]

This field gives the stress range of a single test, which has been applied to the specimen. The stress range is defined as difference between maximum and minimum stress during the cyclic loading. In some cases, original units of the sources had to be converted.

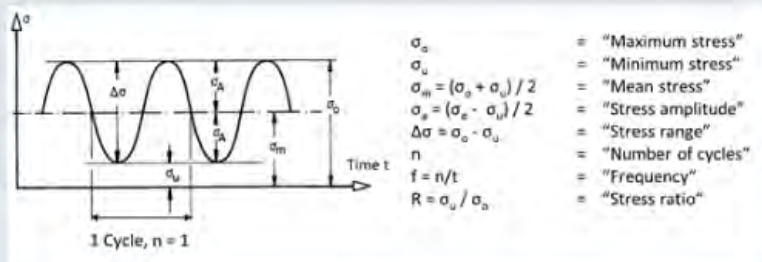


Bild 24-5: Informationsseite „Information“

Figure 24-5: Information page "Information"

SEARCH FOR SERIES

[Home](#) [Test Data](#) [Search for fatigue Data](#) [Evaluation fatigue Data](#) [Insert fatigue Data](#)

Table: Table 8.09 ▼

Detail 01
 Detail 01 Category 01
 Detail 01 Category 02
 Detail 02

GENERAL			
Scale:	no selection ▼	Name:	<input type="text"/>
Part of Commentary:	no selection ▼	Structural Detail:	<input type="text"/>

LOADING			
Kind of loading:	no selection ▼	Constant Amplitude:	no selection ▼

MATERIAL			
Steel Grade:	<input type="text"/>		
Yield Stress:	no selection ▼		
Ultimate Stress:	no selection ▼		

WELD			
Pretreatment:	<input type="text"/>	Posttreatment:	<input type="text"/>

TESTS			
Test information:	no selection ▼		
Stress ratio:	no selection ▼		
Number of tests:	no selection ▼		

[Contact](#) [Impressum](#) [Background](#)

Bild 24-6: Unterseite „Search Series“

Figure 24-6: Subpage "Search Series"

OVERVIEW SEARCH

Test Data
Search for fatigue Data
Evaluation fatigue Data
Insert fatigue Data

ID of series	Description of structural detail	Detail according to EN 1993-1-9	Number of single tests n	Picture	More information
102000	Non Welded Joints	Table 8.1 - Detail 2	38		General Loading Material Welds Environmental Conditions Previous Evaluation Tests Properties
102001	Rolled beam	Table 8.1 - Detail 2	10		General Loading Material Welds Environmental Conditions Previous Evaluation Tests Properties
102002	Rolled beam	Table 8.1 - Detail 2	12		General Loading Material Welds Environmental Conditions Previous Evaluation Tests Properties

Bild 24-7: Unterseite „Overview Search“

Figure 24-7: Subpage "Overview Search"

INFORMATION ON TESTS

🏠
Test Data
Search for fatigue Data
Evaluation fatigue Data
Insert fatigue Data

ID	ID of Series	Test information available?	Stress ratio [-]	Nominal stress range [MPa]	Cycles to rupture N in case of unknown criterion	Cycles to rupture N at 15% change in strain near the point of initiation	Cycles to rupture N at the detection of a crack	Cycles to rupture N at through-thickness cracking	Cycles to rupture N at complete loss of strength	Cycles to rupture N in case of other criterion (see remarks)	Cycles to rupture N until end of tests without failure of specimen	Is the tests a runout?	Failure regeion of test	Remarks
273	104006	no information	0.083333333	370.6621512	0	0	0	0	0	650000	0	no		
274	104006	no information	0.090909091	339.7736386	0	0	0	0	0	1800000	0	no		
275	104006	no information	0.1	308.885126	0	0	0	0	0	4600000	0	no		
276	104006	no information	0.105263158	293.4408697	0	0	0	0	0	0	10200000	no information		

Evaluation for which number of cycles? N in case of unknown criterion ▼

Runout at which number of cycles? 5000000 send

back

Contact
Impressum
Background

Bild 24-8: Unterseite „Evaluation“ – Abfrage
Figure 24-8: Subpage "Evaluation" - Query

EVALUATE SERIES

🏠
Test Data
Search for fatigue Data
Evaluation fatigue Data
Insert fatigue Data

Linear regression analysis (m = 3)

Test ID	Series ID	S [MPa]	N [-]	log S	log N	log a _i	(log ā - log a _i) ²
273	104006	370.6621512	650000	2.569	5.813	13.52	0.098
274	104006	339.7736386	1800000	2.531	6.255	13.849	0
275	104006	308.885126	4600000	2.49	6.663	14.132	0.089

Number of evaluated tests n = 3

Evaluation using prediction interval

Significance level:
 $\alpha = 0.05$

Standard deviation:
 $s = 0.3064$

Appropriate percentage point of Student's t distribution:
 $t = 3.152$

Reference value of fatigue strength:
 $\Delta\sigma_c = 137.75$

back

Contact
Impressum
Background

Bild 24-9: Unterseite „Evaluation“ – Auswertung einer Serie

Figure 24-9: Subpage "Evaluation" – Evaluation of a series

INSERT NEW SOURCE

[Test Data](#) [Search for fatigue Data](#) [Evaluation fatigue Data](#) [Insert fatigue Data](#)

INSERT NEW SOURCE

Author:	<input type="text"/>	Title of publication:	<input type="text"/>
Name of institution:	<input type="text"/>	City of institution:	<input type="text"/>
Country of institution:	<input type="text"/>		
Series:	<input type="text"/>	Volume:	<input type="text"/>
Number:	<input type="text"/>	Pages:	<input type="text"/>
Publisher:	<input type="text"/>	Year:	<input type="text"/>
Language:	<input type="text"/>	Source existent?	no selection ▼

[➔ Insert General Data](#)

[Contact](#) [Impressum](#) [Background](#)

Bild 24-10: Unterseite „Insert New Source“

Figure 24-10: Subpage "Insert New Source"

INSERT INFORMATION

[Test Data](#) [Search for fatigue Data](#) [Evaluation fatigue Data](#) [Insert fatigue Data](#)

Table: Table 8 01 ▾

Detail: Detail 01 ▾

INSERT INFORMATION			
For detailed explanations, please click on the subject You need information about.			
GENERAL			
Name of Series:	<input type="text"/>	Name of Subseries:	<input type="text"/>
Description of structural detail:	<input type="text"/>	Remarks:	<input type="text"/>
Scale of test:	no selection ▾	Is the series part of the Commentary to EC-1-9?	no selection ▾
Last insert source ID: 258		Search for Source ID	
Source ID 1:	<input type="text"/>	Source ID 2:	<input type="text"/>
Source ID 3:	<input type="text"/>	Source ID 4:	<input type="text"/>

Bild 24-11: Unterseite „Insert General Data“

Figure 24-11: Subpage "Insert General Data"

INSERT TEST DATA

[Test Data](#) [Search for fatigue Data](#) [Evaluation fatigue Data](#) [Insert fatigue Data](#)

Last insert series ID: 8007

ID of Series	Test information available?	Stress ratio [-]	Nominal stress range [MPa]	Cycles to rupture N in case of unknown criterion	Cycles to rupture N at 15% change in strain near the point of initiation	Cycles to rupture N at the detection of a crack	Cycles to rupture N at through-thickness cracking
	no selection ▾	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

[Contact](#) [Impressum](#) [Background](#)

Bild 24-12: Unterseite „Insert Test Data“

Figure 24-12: Subpage "Insert Test Data"

25 Anhang D – Versuche an Stirnplattenverbindungen

Annex D – Tests on end plate connections

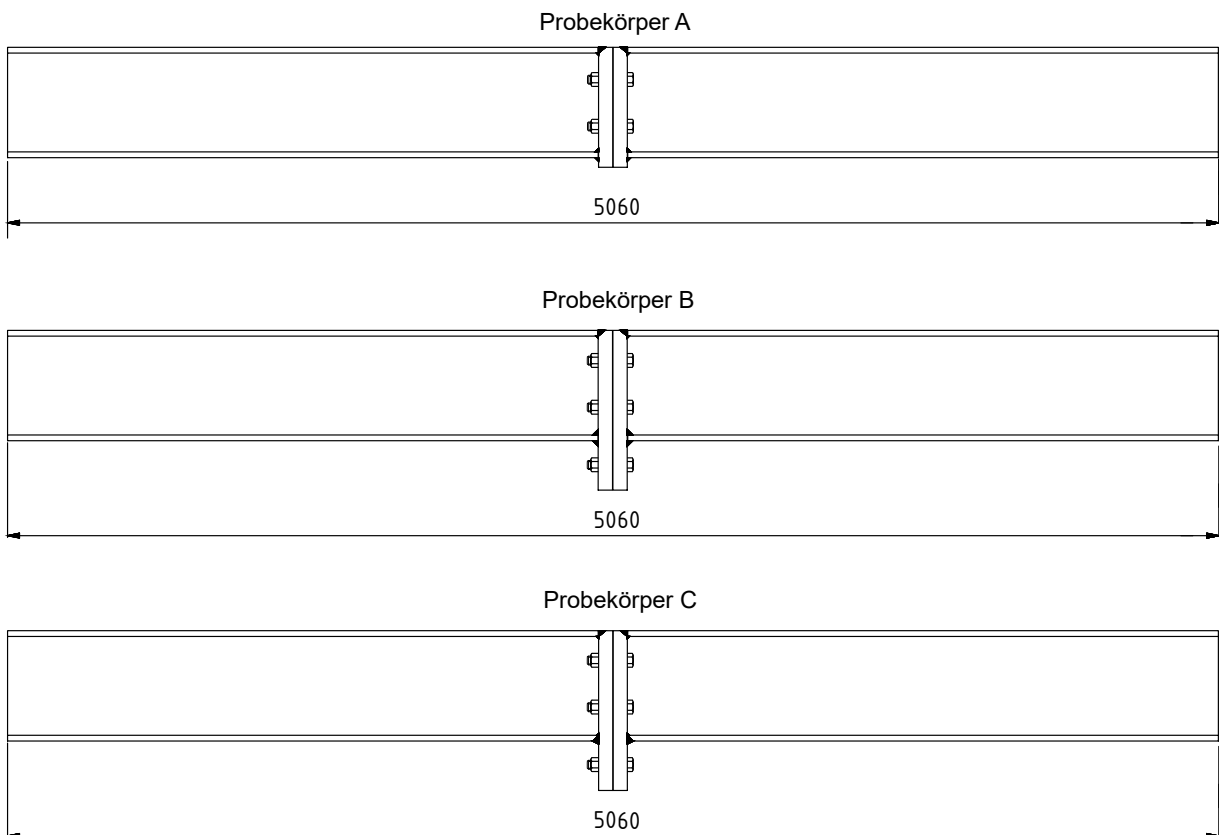


Bild 25-1: Großprobekörper A, B und C

Figure 25-1: Large specimens A, B and C

Anhang D – Versuche an Stirnplattenverbindungen

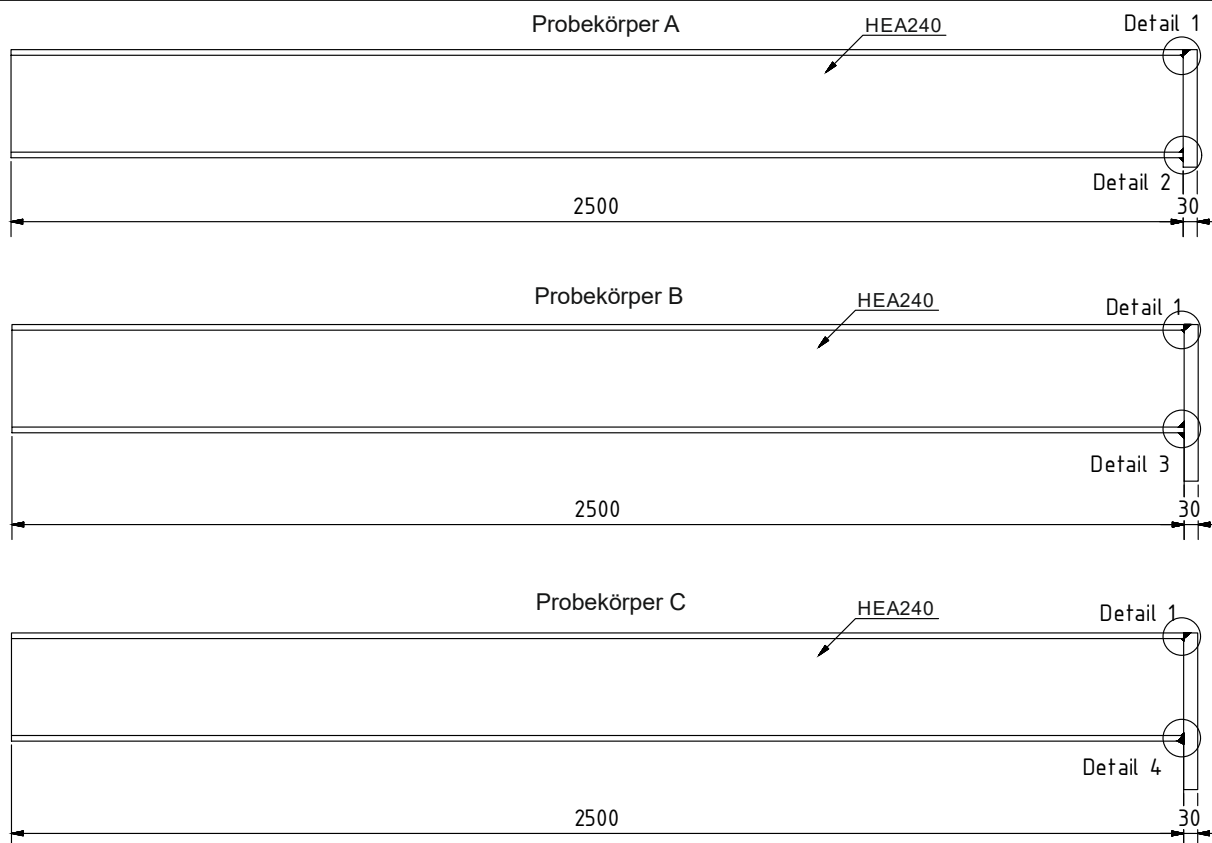


Bild 25-2: Großprobekörper A, B und C mit Details
Figure 25-2: Large specimens A, B and C with details

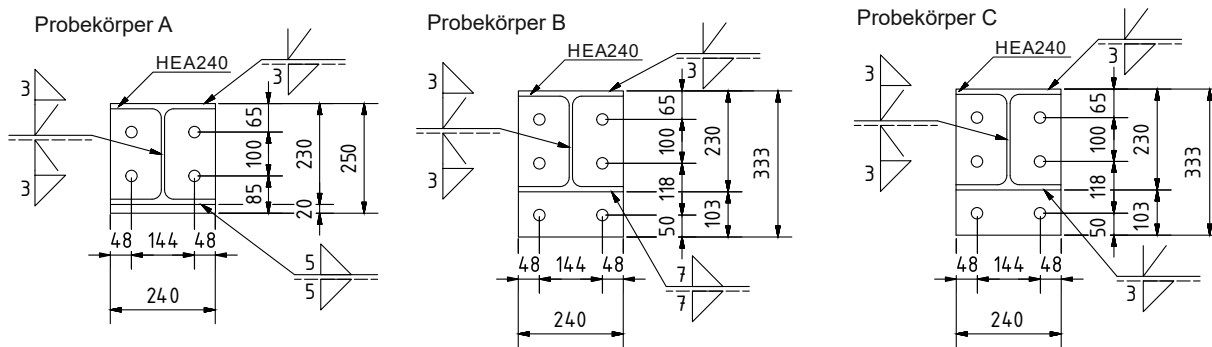


Bild 25-3: Abmessungen der Stirnplattenverbindungen A, B und C
Figure 25-3: Dimensions of endplate connections A, B and C

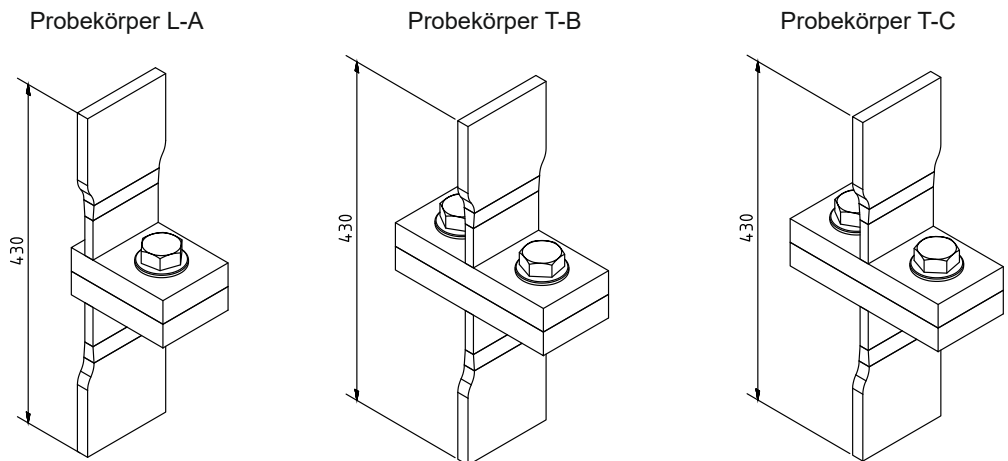


Bild 25-4: Kleinprobekörper LA, TB und TC
Figure 25-4: Small specimens LA, TB and TC

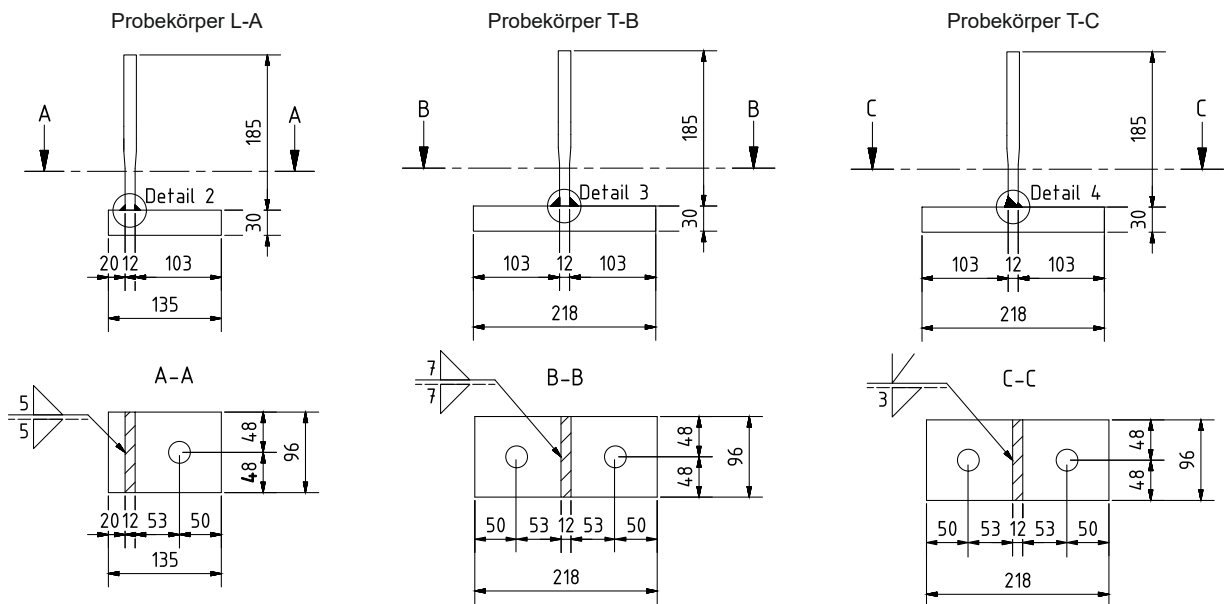


Bild 25-5: Abmessungen der Stöße LA, TB und TC
Figure 25-5: Dimensions of joints LA, TB and TC

Anhang D – Versuche an Stirplattenverbindungen

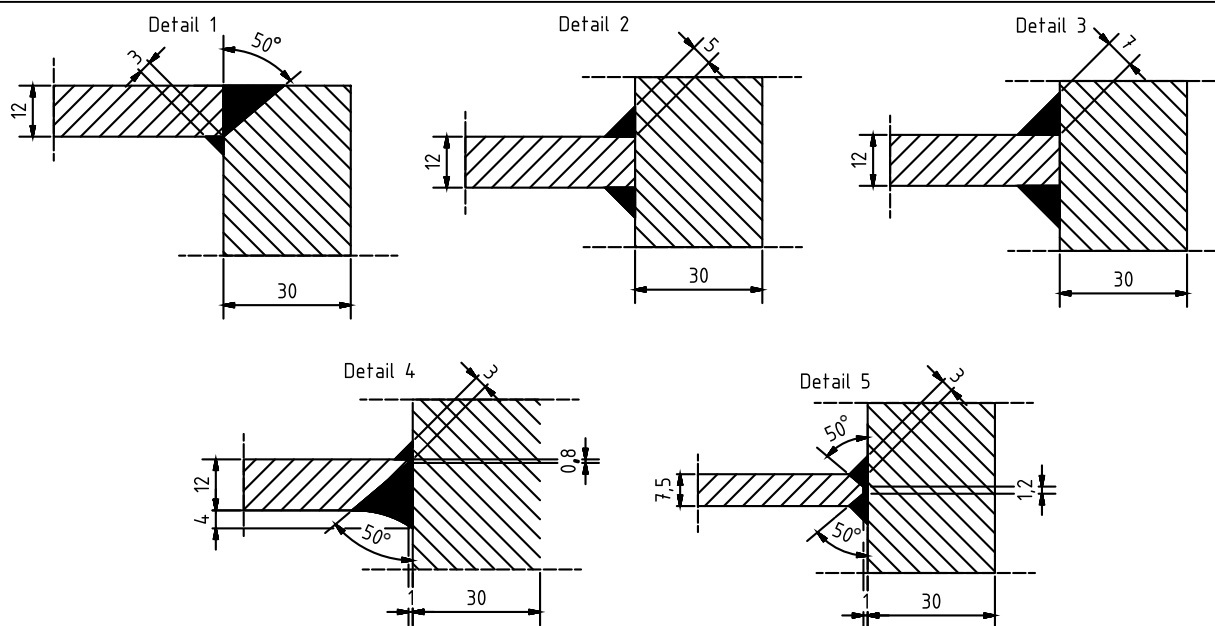


Bild 25-6: Schweißnahtdetails

Figure 25-6: Weld details

Tabelle 25-1: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Bleche

Table 25-1: Mechanical properties of utilised sheets

	Festigkeitseigenschaften		Zähigkeitseigenschaften			
	Steckgrenze R_{eH}	Zugfestigkeit R_m	Kerbschlagenergie KV bei -20°C			
			1	2	3	Mittel
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J]			
Sollwert	> 345	470 - 630	> 27			
Blech 30 mm	407	534	252	271	287	270
Sollwert	> 355	470 - 630	> 27			
Blech 15 mm	429	562	234	238	210	227

Tabelle 25-2: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Bleche - Angaben in %

Table 25-2: Chemical composition of then utilised sheets - in %

Blech	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Ni	Cr	V	Al-T
30 mm	0,142	0,518	1,563	0,012	0,0004	0,028	0,006	0,027	0,028	0,001	0,049
15 mm	0,162	0,220	1,574	0,016	0,0008	0,022	0,007	0,030	0,040	0,001	0,032

Tabelle 25-3: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Träger

Table 25-3: Mechanical properties of utilised beams

	Festigkeitseigenschaften		Zähigkeitseigenschaften			
	Steckgrenze R_{eH}	Zugfestigkeit R_m	Kerbschlagenergie KV bei -20°C			
			1	2	3	Mittel
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J]			
Sollwert	> 355	470 - 630	> 27			
HEA240	400	522	160	189	153	167

Tabelle 25-4: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Träger - Angaben in %

Table 25-4: Chemical composition of then utilised beams - in %

C	Si	Mn	P	S	N	Al	V	Cu	Cr	Ni	Mo
0,07	0,22	1,27	0,014	0,005	0,010	0,017	0,05	0,33	0,08	0,15	0,03

Tabelle 25-5: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Schrauben

Table 25-5: Mechanical properties of utilised bolts

	Zugfestigkeit R_m	Härte	Oberflächen- härte	Zinkschicht- dicke	Kennzeich- nung
	[N/mm ²]	[HBW F = 30D ²]	[HV 0,3]	[µm]	
Sollwert	> 1040	316 - 375	< 390	50 - 102	Friedberg HV 10.9 CE D8
Schraube M24	1127	347	324	63 - 79	

Tabelle 25-6: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Schrauben - Angaben in %

Table 25-6: Chemical composition of then utilised bolts - in %

C	B	Mn	S	Ti	Al	Cr	P	Si
0,3110	0,0032	0,8530	0,0100	0,0370	0,0290	1,1600	0,0110	0,1610

Anhang D – Versuche an Stirnplattenverbindungen

Tabelle 25-7: Fertigungsinformationen Großprobekörper

Table 25-7: Fabrication information large specimens

Großprobekörper	A			B			C		
Detail (Bild 25-6)	1	2	5	1	3	5	1	4	5
Nahtart	HV-Naht, Kehlnaht	Kehl- naht	K- Naht	HV-Naht, Kehlnaht	Kehl- naht	K- Naht	HV-Naht, Kehlnaht	Kehlnaht	K- Naht
Anzahl der Lagen	HV-Naht:3 Kehlnaht: 1	1	3	HV-Naht:3 Kehlnaht: 1	3	3	HV-Naht:3 Kehlnaht: 1	HV-Naht:3 Kehlnaht: 1	3
Schweiß-Reihen- folge	1. K-Naht Steg 2. Kehlnähte Unterflansch 3. Kehlnaht Innenflansch 4. HV-Naht Flansch						1. K-Naht Steg 2. Kehlnähte Innenflansche 3. HV-Nähte Flansch		
Vorbehandlung	Vorwärmen 120°								
Nachbehandlung	keine								
Schweißprozess (DIN EN ISO 4063)	135								
Fertigungsart	manuell								
Schweißposition (DIN EN ISO 6947)	PA								
Schweißge- schwindigkeit	6 min / m								
Füllmaterial	Drahtelektrode G 42 4 M21 3Si1 / G38 2 C1 3Si1 ER70S-6; Werkstoffnummer 1.5125; Durchmesser 0,8 - 1,6 mm								
Streckgrenze Füllmaterial R_{eL} N/mm ²	> 420								
Zugfestigkeit Füllmaterial R_m N/mm ²	500 - 640								
Bewertungs- gruppe	B								
Schutzgas	M 21								

Tabelle 25-8: Fertigungsinformationen Kleinprobekörper

Table 25-8: Fabrication information small specimens

Kleinprobekörper	L-A	T-B	T-C
Detail (Bild 25-6)	2	3	4
Nahtart	Kehlnaht	Kehlnaht	HV-Naht, Kehlnaht
Anzahl der Lagen	1	3	HV-Naht:5 Kehl-naht: 1
Schweiß-Reihenfolge	Kehlnaht beid-seitig	Kehlnaht wechselseitig, je 1 Lage	1. Kehlnaht 2. HV-Naht
Vorbehandlung	keine		
Nachbehandlung	keine		
Schweißprozess (DIN EN ISO 4063)	135		
Fertigungsart	manuell		
Schweißposition (DIN EN ISO 6947)	PA		
Schweißgeschwindigkeit	6 min / m		
Füllmaterial	Drahtelektrode G 42 4 M21 3Si1 / G38 2 C1 3Si1 ER70S-6; Werkstoffnummer 1.5125; Durchmesser 0,8 - 1,6 mm		
Streckgrenze Füllmaterial R_{eL} N/mm ²	> 420		
Zugfestigkeit Füllmaterial R_m N/mm ²	500 - 640		
Bewertungsgruppe	B		
Schutzgas	M 21		

Tabelle 25-9: Charakteristische Schweißnahtgeometrien und Abweichung zu nominellen Werten

Table 25-9: Characteristic weld seam geometries and deviation from nominal values

Probe-körper	Schweißnahtform	Detail (Bild 25-6)	Schweißnahtdicke a_w [mm]		Abweichung [%]
			nom	ch	
A	Doppelkehlnaht	2	5	5,61	12,2
B	Doppelkehlnaht	3	7	8,08	15,4
			Schweißnahthöhe z_v		
C	HV-Naht	4	4	8,5	112,5

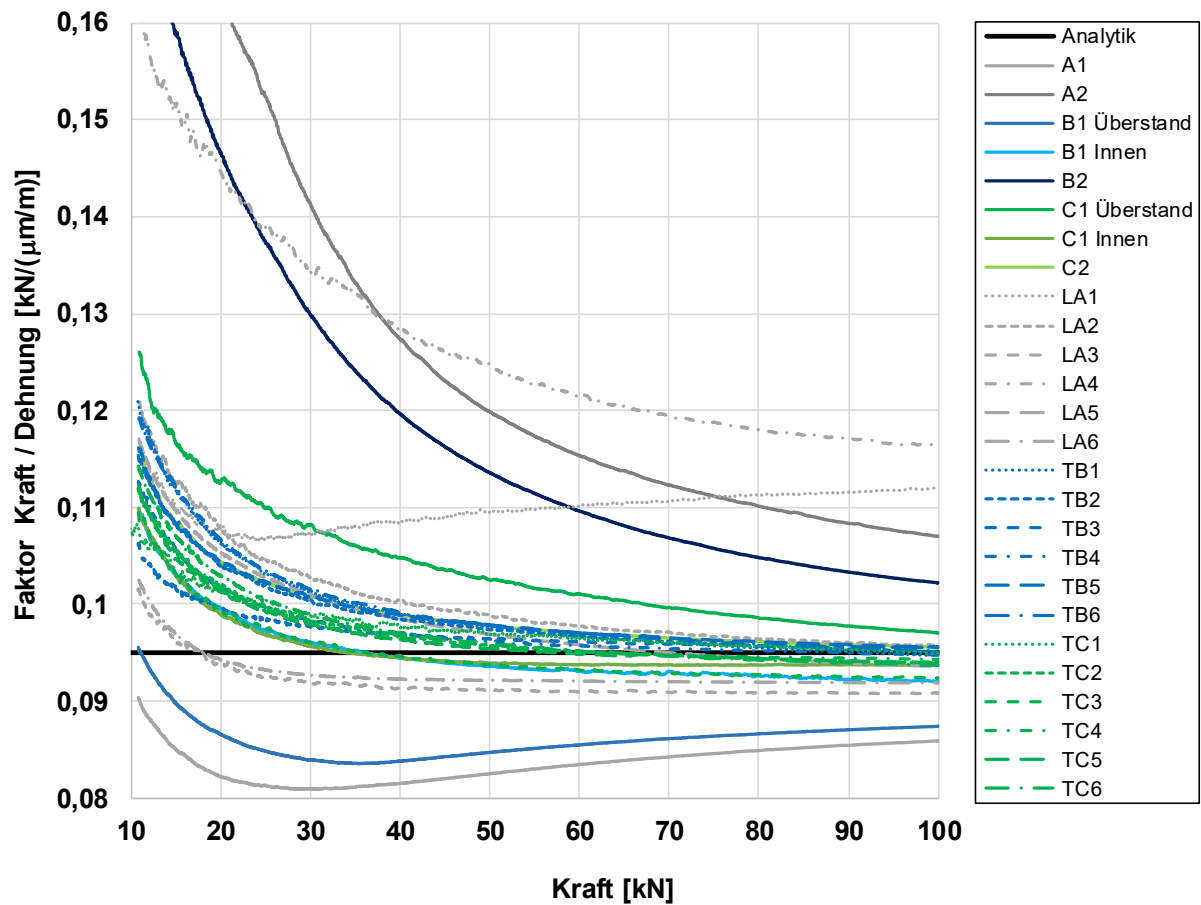


Bild 25-7: Verhältnis von Kraft zu Dehnung während der Kalibration der Messschrauben

Figure 25-7: Force to strain ratio during calibration of measurement bolts

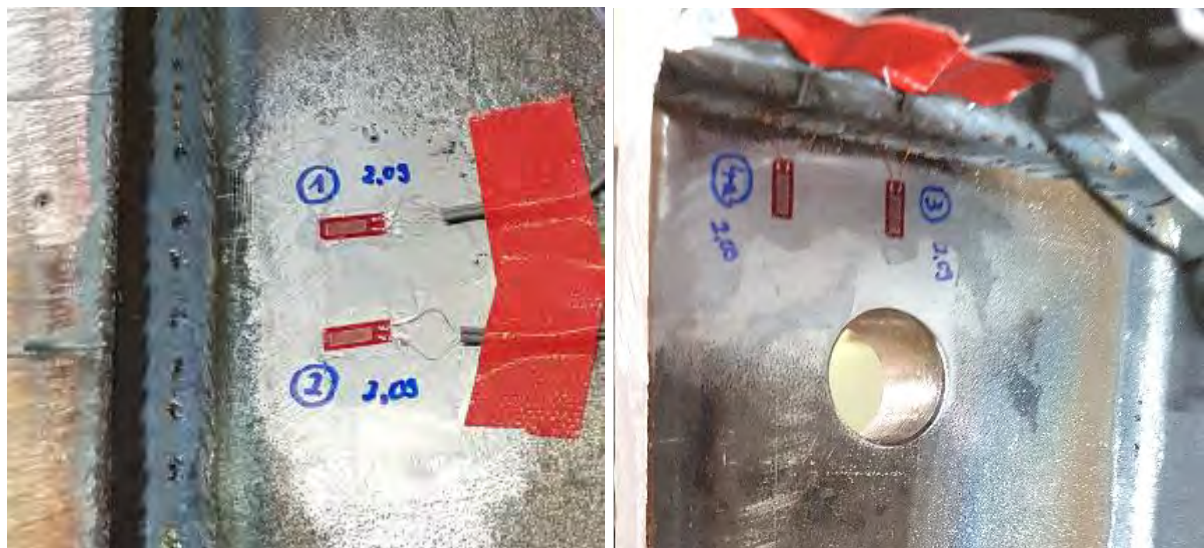


Bild 25-8: DMS1 – DMS 4a eines Großprobekörpers

Figure 25-8: DMS1 - DMS 4a of a large-scale specimen



Bild 25-9: Messschraube DMS 5 eines Großprobekörpers
Figure 25-9: Measurement bolt DMS 5 of a large-scale specimen

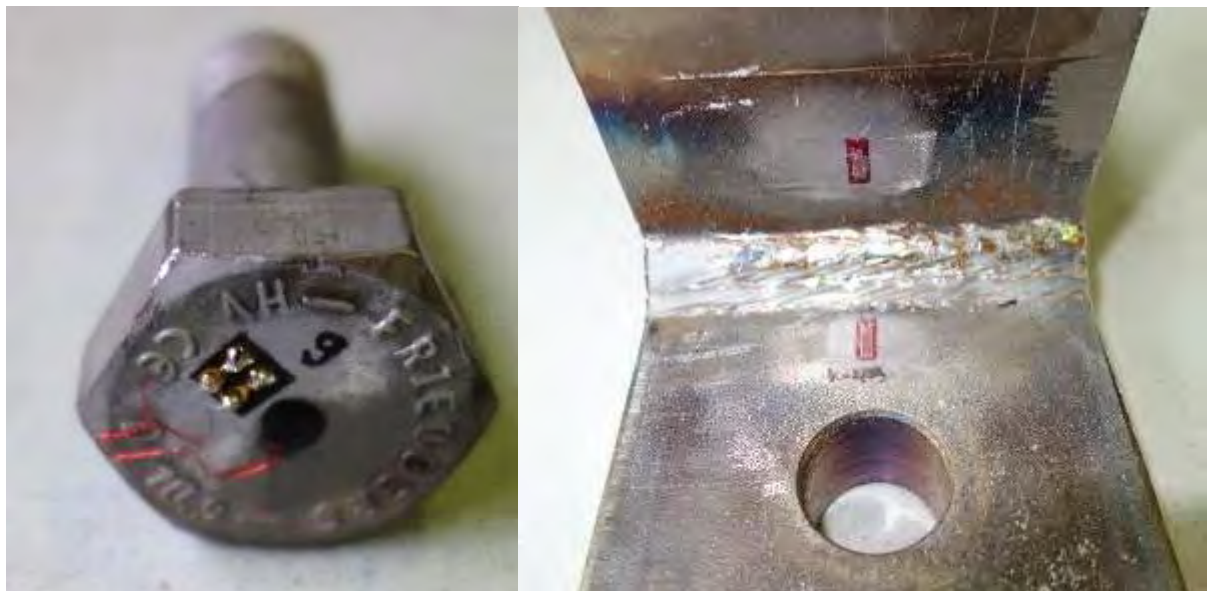


Bild 25-10: Messschraube DMS 1s und DMS 2 und DMS 3 eines Kleinprobekörpers
Figure 25-10: Measurement bolt DMS 1 and DMS 2 and DMS 3 of a small-scale specimen

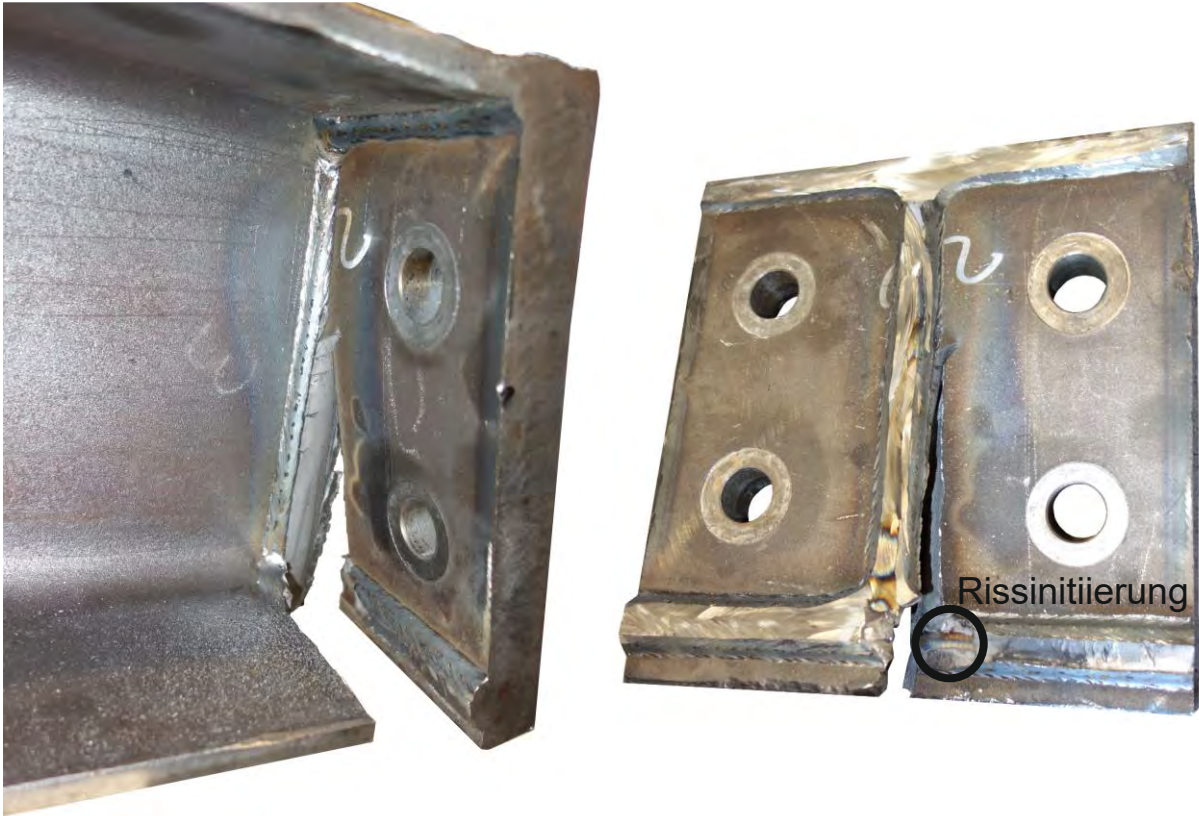


Bild 25-11: Versagen des Probekörpers A1

Figure 25-11: Failure of the specimen A1

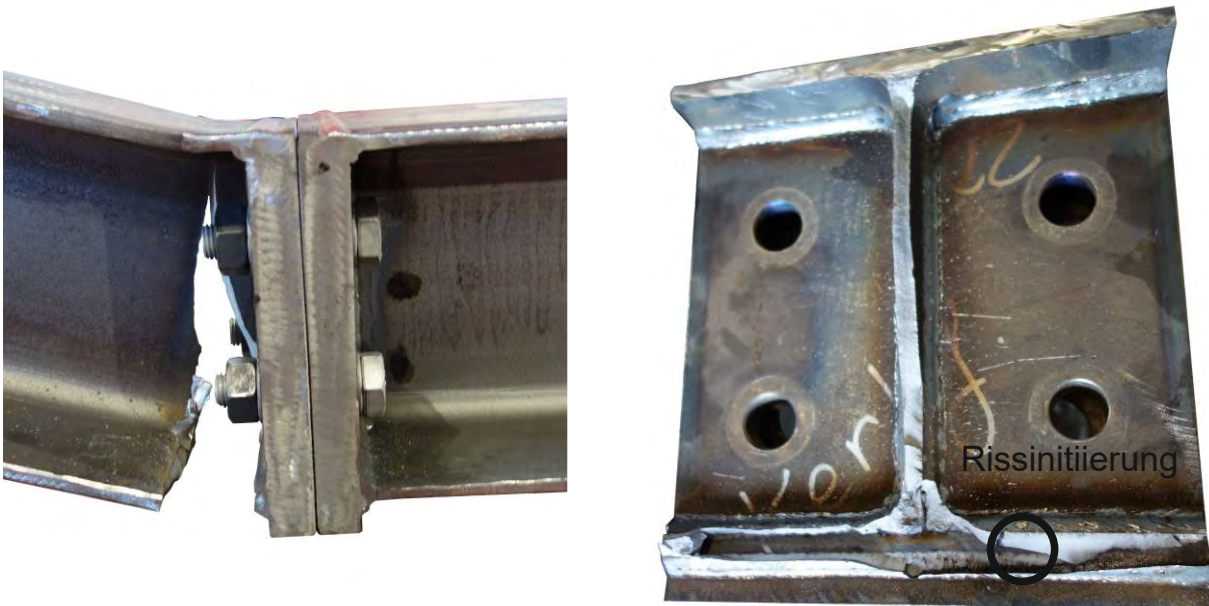


Bild 25-12: Versagen des Probekörpers A2

Figure 25-12: Failure of the specimen A2

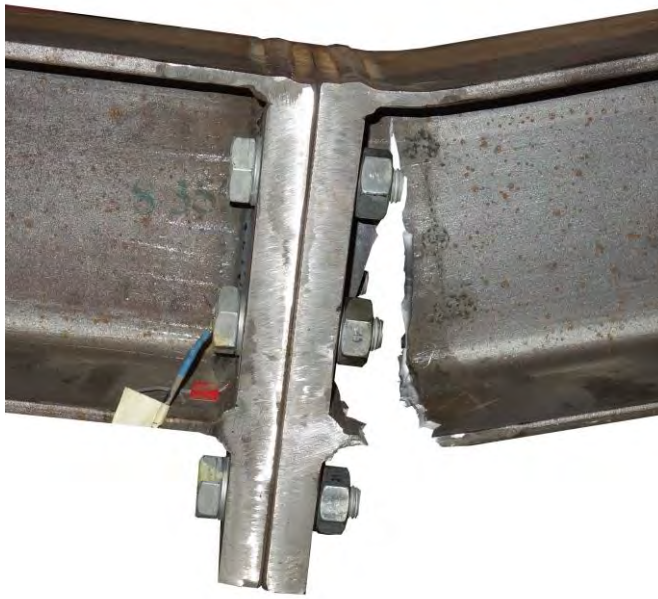


Bild 25-13: Versagen des Probekörpers B1

Figure 25-13: Failure of the specimen B1



Bild 25-14: Versagen des Probekörpers B2

Figure 25-14: Failure of the specimen B2

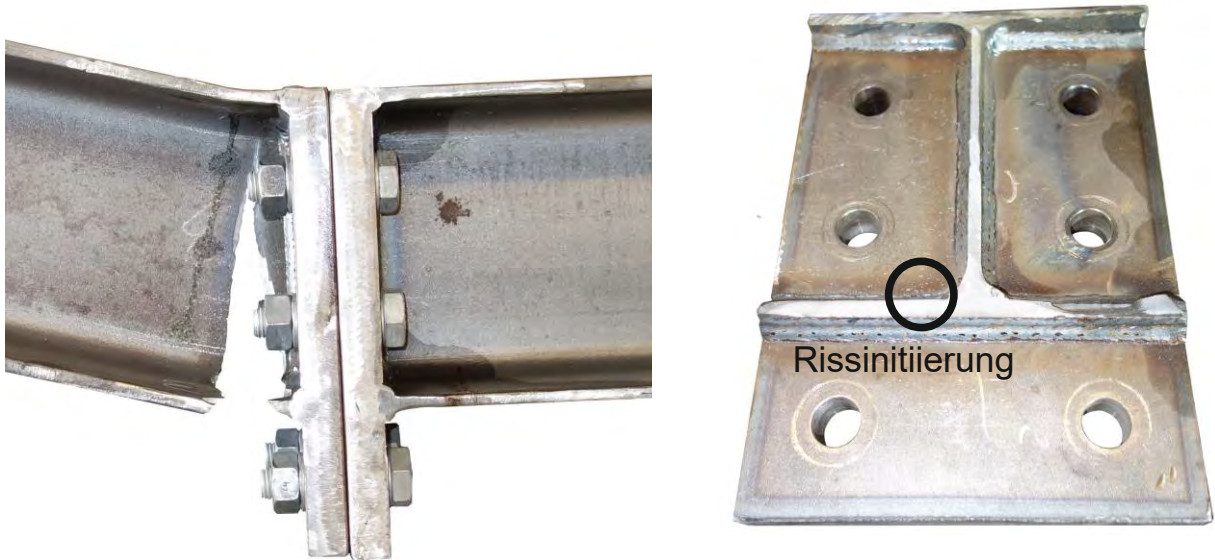


Bild 25-15: Versagen des Probekörpers C2

Figure 25-15: Failure of the specimen C2

26 Anhang E – FE Modell Gurtlamellenende

Annex E – FE Model belt lamella end

26.1 Modellbildung

Modeling

Für die Bewertung weiterer strukturmechanischer Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit von Gurtlamellenenden wurde mithilfe des Kerbspannungskonzepts ein parametrisiertes Finite-Element Modell (FE-Modell) in Ansys erstellt. Die Randbedingungen des Modells (z.B. Kerbmodellierung und Materialeigenschaften) entsprechen den Vorgaben im DVS Merkblatt 0905 [120]. Alle Modelle sind dreidimensional. Für die Vernetzung wurden Volumenelemente mit quadratischem Verschiebungsansatz gewählt (SOLID 186 und SOLID 187 Elemente).

Um die Kerbspannungen in den für die Ermüdung kritischen Bereichen (Schweißnaht-übergang und Schweißnaht-wurzel) in der erforderlichen Genauigkeit ermitteln zu können, ist eine sehr feine Vernetzung erforderlich. Zur Verkürzung der Rechenzeit wurde das Modell mithilfe der Submodelltechnik berechnet, in der die Verschiebungen an einem relativ groben Netz am Gesamtmodell ermittelt werden und die Berechnung der Spannungen anschließend an einem fein vernetzten Submodell erfolgt. Der Nahtübergang wurde mit Hinterschnitt und die Nahtwurzel als Schlüsselochkerbe modelliert. Das Globalmodell nutzt alle 3 Symmetrieebenen aus, um die Berechnungszeit zu minimieren.

Die Parameter zur Erstellung des Modells sind in Tabelle 26-1 und Bild 26-1 dargestellt:

Tabelle 26-1: Parameter Beschreibung

Table 26-1: Parameter description

Variable	Beschreibung
Gurt	
l_{Gurt}	Länge des halben Gurts
b_{Gurt}	Breite des halben Gurts
d_{Gurt}	Höhe des halben Gurts
Lamelle	
l_{Lamelle}	Länge der halben Lamelle
b_{Lamelle}	Breite der halben Lamelle
d_{Lamelle}	Höhe der Lamelle
l_{Fase}	Länge der Fase
d_{Fase}	Höhe der Fase ab Oberkante Lamelle
Stirrnaht	
l_{Stirn}	Länge der Stirrnaht
b_{Stirn}	Breite der Stirrnaht
d_{Stirn}	Höhe der Stirrnaht
Längsnaht	
$l_{\text{längs}}$	Länge der Längsnaht
$b_{\text{längs}}$	Breite der Längsnaht
$d_{\text{längs}}$	Höhe der Längsnaht
Ecknaht	
l_{Eck1}	Länge Abschnitt Kante Lamelle bis Längsnaht
l_{Eck2}	Länge Abschnitt Kante Lamelle bis Nahtübergang
b_{Eck1}	Breite Naht auf Höhe Längsnaht
b_{Eck2}	Breite Naht auf Höhe Kante Lamelle
d_{Eck1}	Höhe der Ecknaht auf Höhe Längsnaht
d_{Eck2}	Höhe der Ecknaht auf Höhe Stirrnaht

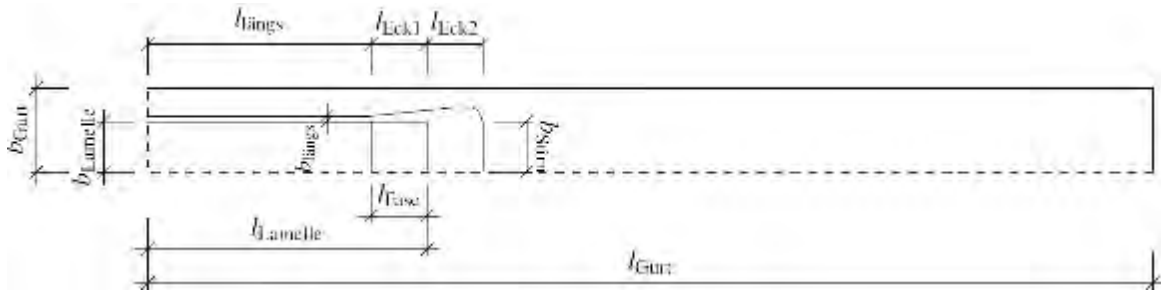


Bild 26-1: Parameter Beschreibung

Figure 26-1: Parameter description

26.2 Kerbmodellierung

Modeling of the notch

Das Kerbspannungsmodell nach Radaj [152] und Neuber [27] setzt für Schweißnahtübergänge und Schweißnahtwurzel einen fiktiven Kerbkrümmungsradius ρ_f von 1 mm an. Dieser fiktive Kerbkrümmungsradius berücksichtigt die Mikrostützwirkung von geschweißten Kerben, wobei der tatsächliche Kerbkrümmungsradius als unendlich klein angenommen wird. Die Bewertung des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Gurtlamellenendes mit diesem Verfahren ist nur eingeschränkt möglich, da der Schweißnahtübergang kerbfrei bearbeitet wird und keine scharfe geometrische Kerbe darstellt. Die Festlegung eines Ersatzradius für den nachbearbeiteten Schweißnahtübergang ist nur eingeschränkt möglich. Untersucht wurde der Übergangsradius anhand von Makroschliffen, wobei der geometrisch bestimmte Radius stark von der bildlichen Auflösung und der Vergrößerung des Kerbbereiches abhängt. Zudem unterschieden sich die Prüfkörper hinsichtlich der nach dem Schweißen verbleibenden Restkerbe deutlich. Um die Nachbearbeitung vereinfacht darzustellen wurde ein tatsächlicher Kerbkrümmungsradius von 1 mm angenommen. Unter Berücksichtigung der Mikrostützwirkung nach Neuber [27] wurde somit ein fiktiver Kerbkrümmungsradius von 2 mm angenommen.

Nach dem DVS Merkblatt 0905 [120] können Nahtübergänge sowohl mit (vgl. Bild 26-2 (a)) als auch ohne Hinterschnitt mit (vgl. Bild 26-2 (b)) modelliert werden. Voruntersuchungen zeigten, dass die Modellierung mit Hinterschnitt zu deutlich konservativeren Kerbspannungen führt. Die Wurzelkerbe kann als „Schlüssellochkerbe“ (vgl. Bild 26-2 (a)) ausgebildet werden. Die hier gezeigten Modellierungen beziehen sich auf die Variante nach Bild 26-2 (a), also mit Hinterschnitt (vgl. Bild 26-2 (c)) und Schlüssellochkerbe (vgl. Bild 26-2 (d)).

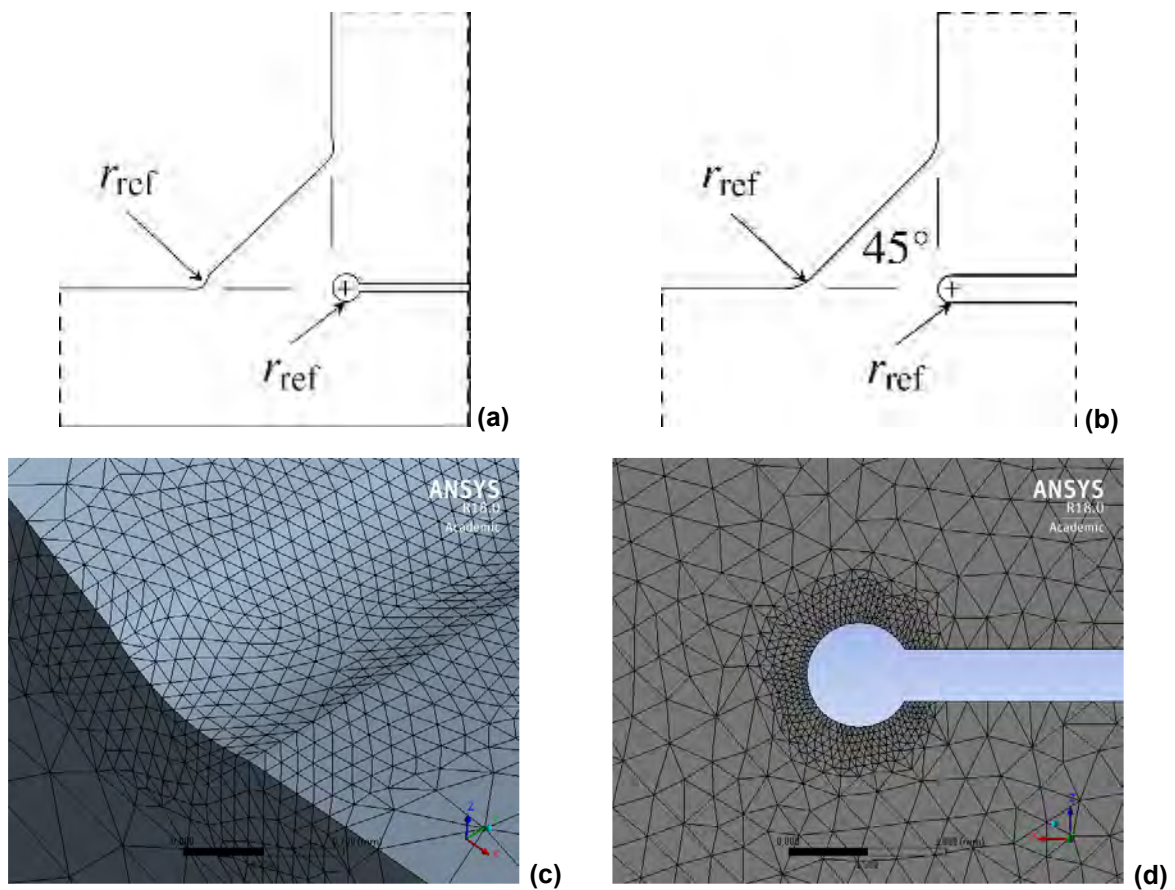


Bild 26-2: Kerbgeometrie
 Figure 26-2: Geometry of the notch

26.3 Validierung

Validation

Die Validierung des Modells erfolgte anhand eines Vergleichs des Dehnungsanstiegs vor dem Schweißnahtübergang im Experiment und im FE-Modell. Bei jeweils einem Prüfkörper jeder Serie wurde der Dehnungsanstieg anhand von mehreren hintereinander angeordneten DMS vor dem Schweißnahtübergang aufgezeichnet, vgl. Bild 27-3. Die Anordnung der DMS erfolgte beidseitig, um kleine Biegeeinflüsse in den Versuchskörpern zu berücksichtigen.

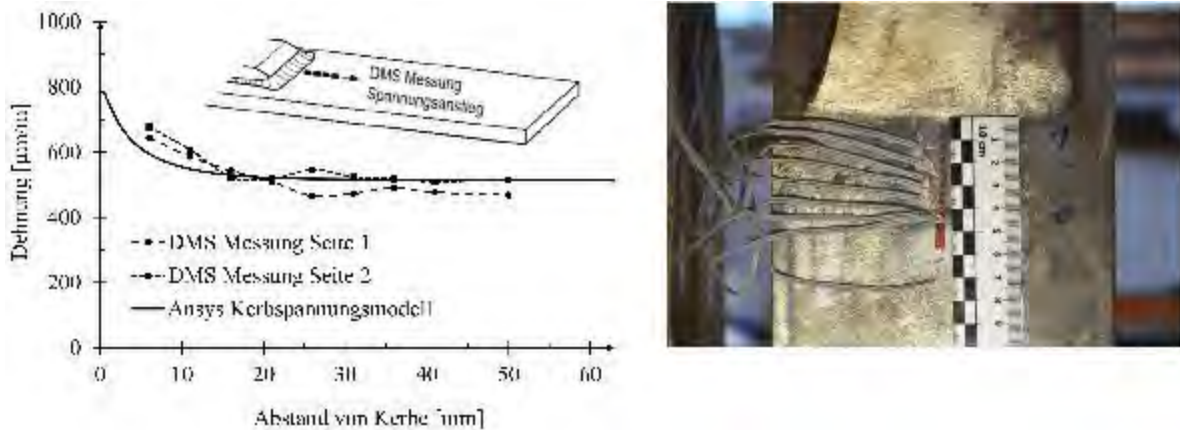


Bild 26-3: Validierung

Figure 26-3: Validation

Der Vergleich des Dehnungsgradienten im FE Modell mit den gemessenen Dehnungen zeigt eine gute Übereinstimmung.

Neben der Validierung am Prüfkörper erfolgte ein Abgleich des FE Modelles mit Beispielrechnungen von Radaj [152].

Das Modell, das für den Vergleich gewählt wurde, ist in Bild 26-4 dargestellt. Für dieses Modell wurde von Radaj [152] für den Nahtfuß eine Kerbwirkungszahl von $\beta_{kz} = 2,45$ und für die Nahtwurzel eine Kerbwirkungszahl von $\beta_{kw} = 1,77$ berechnet.

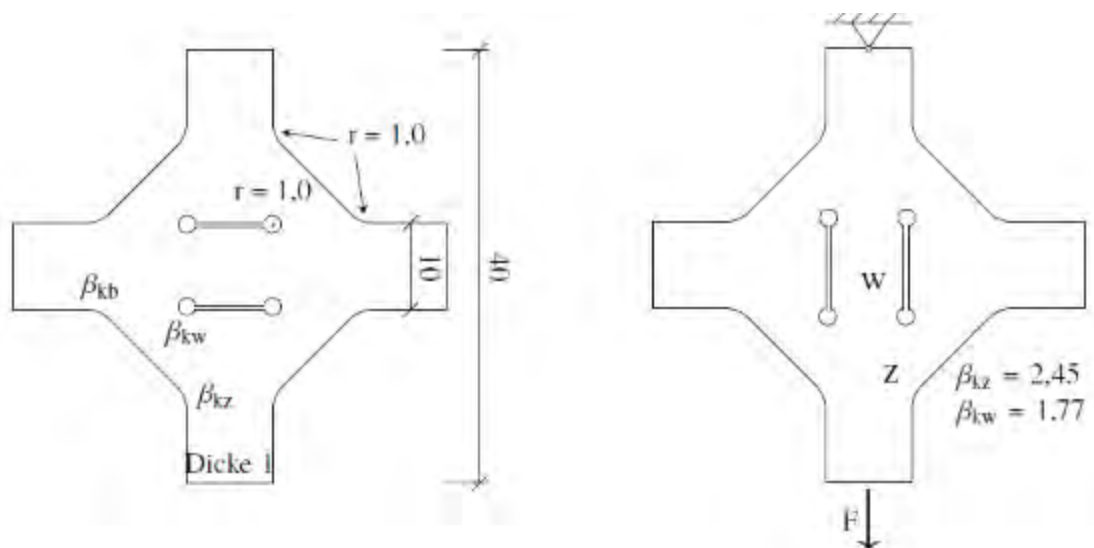


Bild 26-4: Vergleichsmodell nach Radaj [152]

Figure 26-4: Model according to Radaj [152]

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der verwendeten Methoden im FE-Modell wie beispielsweise der Netzverfeinerung oder der Kerbenart wurde die Geometrie nachmodelliert. Im Gegensatz zum Modell von Radaj wurde beim Vergleichsmodell am Nahtübergang eine Kerbe mit Hinterschnitt modelliert.

Da das Modell von Radaj ein 2-D Modell ist wurde für das hier untersuchte dreidimensionale Modell eine Tiefe mit 10mm gewählt. Da das Modell in zwei Richtungen symmetrisch ist, wurden Symmetriebedingungen in x-, und z-Richtung eingefügt. Die Last wurde an

der Stirnseite in Form einer Flächenlast von 100 N/mm^2 aufgebracht. Die Elementgröße wurde mit $0,2 \text{ mm}$ und einer weiteren Verfeinerung auf ca. $0,05 \text{ mm}$ in den Kerben hinreichend klein gewählt. Die Kerbzahl bei dem nachmodellierten Bauteil betrug in der Wurzel $b_{kw} = 1,78$ im Vergleich zu dem in der Literatur ermittelten Faktor von $b_{kw} = 1,77$, was eine gute Näherung darstellt. Im Gegensatz dazu ergab die Berechnung der Kerbzahl am Nahtübergang einen Wert von $b_{kz} = 2,64$ im Vergleich zu dem Faktor $b_{kz} = 2,45$, der von Radaj ermittelt wurde. Da die Kerbzahlen an der Wurzel übereinstimmten und nur am Nahtübergang voneinander abwichen, wurde zum Vergleich die Kerbe am Nahtübergang ohne Hinterschnitt modelliert. Bei ansonsten gleichem Modell wurde nun eine Kerbzahl von $2,48$ ermittelt, was dem Wert von $2,45$ deutlich näher kommt. Zur weiteren Anpassung wurde die Modellbreite verkleinert, da eine weitere Verfeinerung des Netzes nur zu Änderungen an der 3. Nachkommastelle führte. Die Verkleinerung der Modelltiefe (y-Richtung) führte zu einer weiteren Annäherung der Kerbzahl auf $2,46$ und war damit hinreichend angepasst. Bezüglich der Gestaltung der Kerbe am Nahtübergang mit oder ohne Hinterschnitt ergaben die Berechnungen der Variante mit Hinterschnitt ein konservativeres Ergebnis. Dies bestätigt die Angaben im DVS Merkblatt 0905 [120] und die Wahl der Modellierung des Nahtübergangs mit der Kerbe mit Hinterschnitt. Des Weiteren zeigt die Untersuchung, dass die FE-Rechnungen mit ANSYS mit den Ergebnissen von Radaj übereinstimmen. Die gewählten Konfigurationen sind somit für die weiteren Untersuchungen geeignet und führen zu vergleichbaren Ergebnissen.

27 Anhang F – FE Modell zur Stumpfnah

Annex E – FE Model belt lamella end

Modellbildung

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) teilt erstellte dreidimensionale Modelle mittels eines Netzes in endlich viele dreidimensionale Elemente ein. Innerhalb dieser Elemente werden die Spannungen nach Aufbringung einer Last berechnet, wodurch ein Spannungsverlauf im gesamten Bauteil ermittelt werden kann. Je feiner das Netz eingestellt wird, je kleiner also die einzelnen Elemente sind, desto genauer werden die Ergebnisse. Für diese Berechnung wurde ein dreidimensionales Modell erstellt, das der Form zweier Bleche, die zusammengeschweißt wurden, entsprechen soll. Zur Erstellung des Modells wurde angenommen, wie dies auch in der DIN EN 1993-1-9 [1] gehandhabt wird, dass die Form der Schweißnaht einem Teilkreis entspricht. Weiterhin wurde der Kerbradius entsprechend der Empfehlung des IIW [16] auf 1 mm festgesetzt. Dadurch ergab sich eine Geometrie der Schweißnahtüberhöhung, wie sie in Bild 27-1 dargestellt ist.

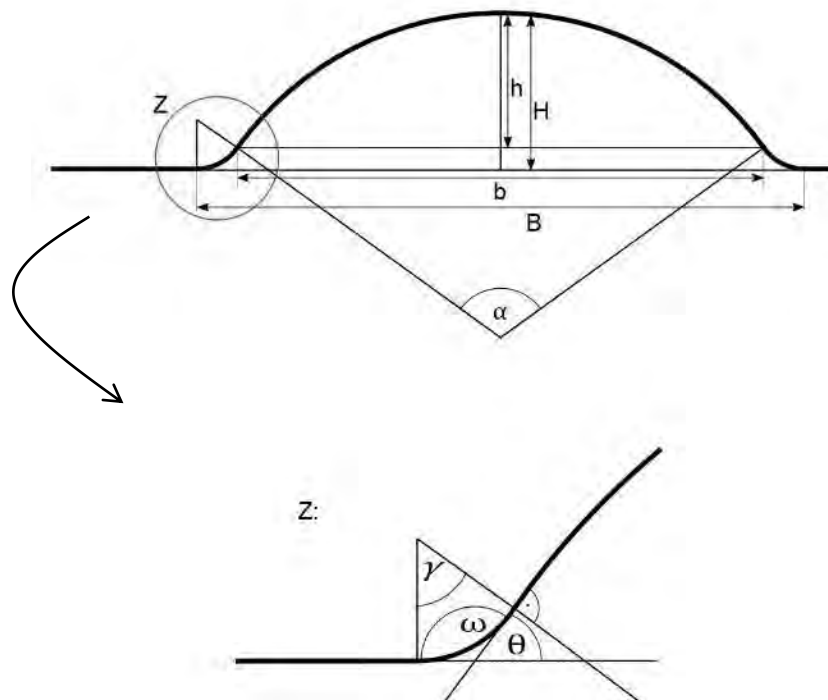


Bild 27-1: Geometrische Definition Stumpfstoß

Figure 27-1: Geometrical definition butt joint

Die Größen wurden so gewählt, dass die unabhängigen Dimensionen den Größen entsprechen, die auch an realen Bauteilen leicht abzulesen sind. In diesem Fall sind das die Nahtbreite B und die Nahtüberhöhung H , in deren Abhängigkeit alle anderen Größen berechnet werden können. Der Nahtanstiegswinkel θ ist, wie es in den vorangegangenen Kapiteln bereits erwähnt wurde, von besonderem Interesse und ergibt sich aus der Segmenthöhe h und der Kreissehne b des Kreissegmentes, siehe Formel (27.2).

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{4hb}{4h^2 + b^2}\right) \quad (27.1)$$

$$\gamma = \theta = \frac{1}{2} \cdot \alpha = \arcsin\left(\frac{4hb}{4h^2 + b^2}\right) \quad (27.2)$$

Dazu wird erst der Winkel α des Kreissegmentes, wie in Formel (27.1), berechnet, woraus sich der Winkel γ des Nahtübergangs ergibt, der wiederum dem gesuchten Nahtanstiegs-
winkel θ entspricht. Der entsprechende Kerböffnungswinkel ω kann nach Formel (27.3)
berechnet werden.

$$\omega = 180^\circ - \theta \quad (27.3)$$

Werden statt der Segmenthöhe h und der Kreissehne b , die Nahtüberhöhung H und Naht-
breite B eingesetzt, ergeben sich sowohl im Modell, als auch in den Spannungsverläufen,
nur verschwindend geringe Veränderungen. Somit kann näherungsweise auch die Formel
(27.4) verwendet werden.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{4HB}{4H^2 + B^2}\right) \quad (27.4)$$

Bei der Erstellung des Modells wurde mit Autodesk Inventor im Zusammenhang mit einer
Excel Tabelle gearbeitet. So konnten die Werte auch im weiteren Verlauf der Arbeit leicht
verändert und angepasst werden. Die Berechnungen des FE Modells wurden mit Ansys-
Workbench durchgeführt. Um die benötigte Rechenleistung zu verringern, wurde die Mög-
lichkeit der Symmetrie genutzt, weshalb bei der in Bild 27-2 dargestellten V-Naht-Verbin-
dung sowohl die Schweißnaht, als auch die Blechbreite zur Hälfte dargestellt sind.

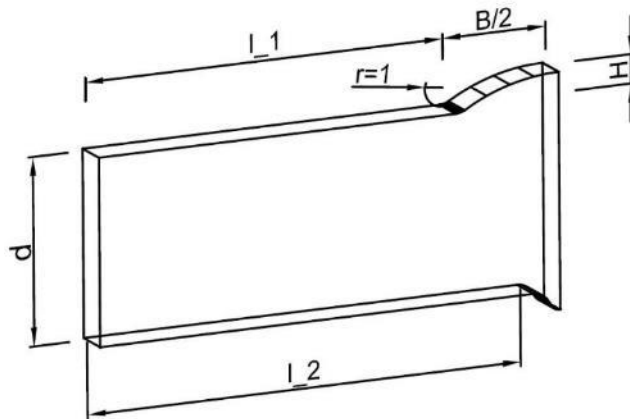


Bild 27-2: FE Modell

Figure 27-2: FE model

Der später berechneten X-Naht wurde eine weitere Symmetrie in der Mitte des Bauteils
der Länge nach eingefügt, da in diesem Fall die obere und untere Schweißnaht gleiche
Ausmaße aufweisen. Ob es sich dabei tatsächlich um eine X-Naht oder aber um eine I-
Naht handelt, kann in diesem Modell nicht unterschieden werden, da das Innere der Naht
nicht berücksichtigt wird. Dennoch wird im Fortlauf dieser Arbeit bei dieser Art der Naht
von einer X-Naht gesprochen. Die in Bild 27-2 dargestellten Werte l_1 und l_2 bezeichnen
die Länge eines Blechs nach Abzug der jeweiligen Nahtbreiten. An diese Länge anschlie-

ßend beginnt der Radius hin zur Schweißnaht. Sowohl die Nahtbreite B als auch die Nahthöhe H sind ab dem Beginn des Kerbradius definiert. Die Krümmung der Naht kommt durch das Festlegen der Nahtbreite und Nahthöhe zustande, wenn sich der Mittelpunkt des Nahtradius senkrecht zum höchsten Punkt der Naht befindet. Diese Art der Modellierung kann umgesetzt werden, solange das Höhen/Breiten-Verhältnis der Naht nicht größer als $1/2$ ist. Da ein größeres Verhältnis in der Realität nicht vorkommt, stellt dies keine Einschränkung dar. Zur einfachen Berechnung des Kerbfaktors wurden die einwirkenden Zugkräfte immer so gewählt, dass sich eine Nennspannung von 100 MPa einstellte.

Validierung

Um zu überprüfen, ob das Modell der Realität entspricht, wurden die Ausmaße eines Bauteils von Radaj übernommen und mit dessen Ergebnissen verglichen [152]. Das Referenzmodell, das eine V-Naht-Verbindung beinhaltet, hat eine Gesamtlänge von 40 mm, eine Blechdicke von 10 mm eine Nahthöhe von 1,5 mm und eine Nahtbreite von 11,5 mm, woraus sich ein Nahtanstiegswinkel von 30° ergibt. Auch hier wurde ein Kerbradius von 1 mm eingehalten, wie es in Bild 27-3 a) zu sehen ist. Diese Werte wurden in das Modell übernommen und eine Blechbreite von 0,1 mm hinzugefügt, um aus dem vorhandenen 2D Modell ein 3D Modell zu erstellen (siehe Bild 27-3 b)).

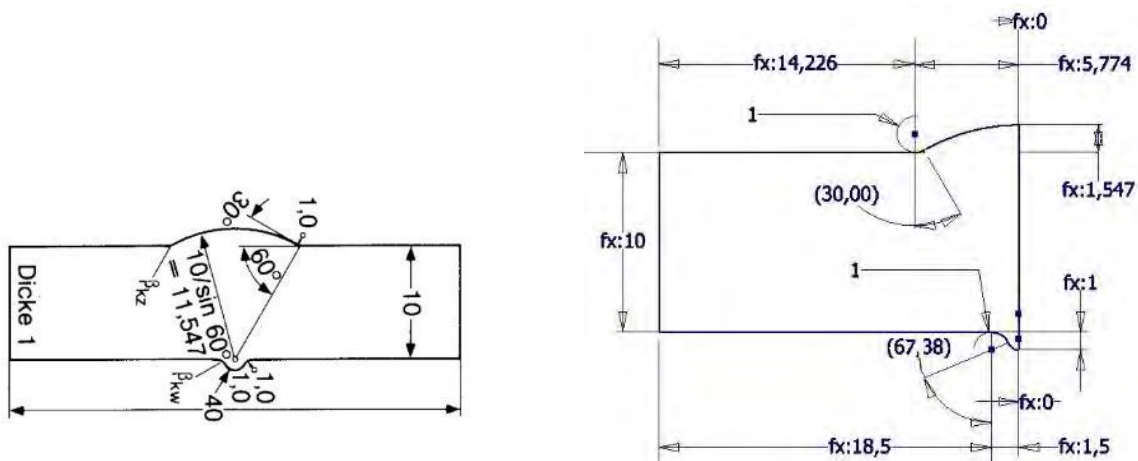


Bild 27-3: Referenzmodell (a) und Umsetzung (b)
Figure 27-3: reference model (a) and implementation (b)

Die Werte in Bild 27-3b) in Klammern ergeben sich hierbei aus den übrigen vorgegebenen Werten, die nicht in Klammern stehen. Während das Referenzmodell aufgrund von Zugbelastung in der Wurzel einen Kerbfaktor $\beta_{kw} = 1,69$ angibt, erreichte das eigene Modell bei einer Netzfeinheit mit einer Elementgröße von 0,12 mm einen Kerbfaktor von 1,699. An der breiteren Seite der Naht wurde im Referenzmodell ein $\beta_{kz} = 1,89$ erreicht, an der das eigene Modell einen Wert von 1,822 ergab. Die Abweichungen können auf den Umstand zurückgeführt werden, dass das Referenzmodell zwei Dimensionen hat, während das eigene Modell zwar sehr dünn ausgeführt ist, aber somit dennoch drei Dimensionen aufweist. In Bild 27-4 ist das Bauteil mit der genannten Netzfeinheit dargestellt, wie es zur Validierung verwendet wurde.

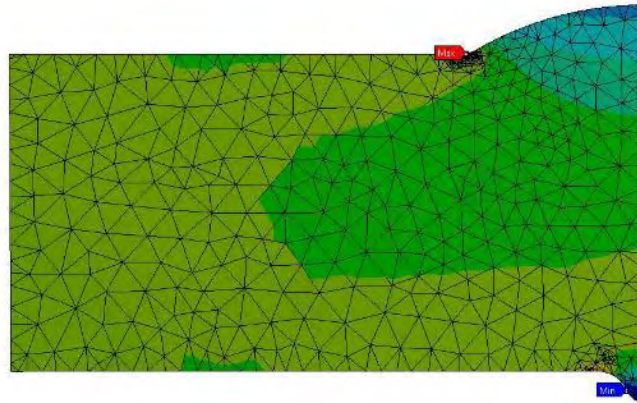


Bild 27-4: Netzfeinheit

Figure 27-4: Fineness of the mesh

Sensitivitätsanalyse

Bei der Sensitivitätsanalyse wird geprüft, in wie weit sich das Ergebnis ändert, wenn ein bestimmter Wert verändert wird. In diesem Fall wurde die Sensitivität der Elementgröße des Netzes innerhalb des Modells geprüft, da kleine Elementgrößen im Allgemeinen zwar genauere Ergebnisse liefern als Größere, jedoch auch ein Vielfaches der Rechenleistung benötigen. Unabhängig davon wurde die Netzfeinheit im Bereich der Naht immer um das Dreifache erhöht, da diese Werte von besonderem Interesse sind. Die Sensitivitätsanalyse wurde an dem gleichen Bauteil durchgeführt, das zur Validierung diente. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass ab einer Elementgröße mit einer Seitenlänge von 0,2 mm die maximalen Spannungen immer größer werdenden Schwankungen unterworfen sind und immer weiter vom ursprünglichen Wert abweichen. Wie auch in Bild 27-5 erkennbar, sind die maximalen Spannungen bei einer Netzfeinheit mit einer Seitenlänge von 0,2 mm und kleiner jedoch konstant. So wurde die Entscheidung getroffen, alle weiteren Analysen bei einer Elementgröße von 0,12 mm durchzuführen, sodass kein Verlust der Genauigkeit befürchtet werden muss, wobei auch hier im Bereich der Kerbe, also der maximalen Spannung, eine Netzverfeinerung um das Dreifache vorgenommen wurde.

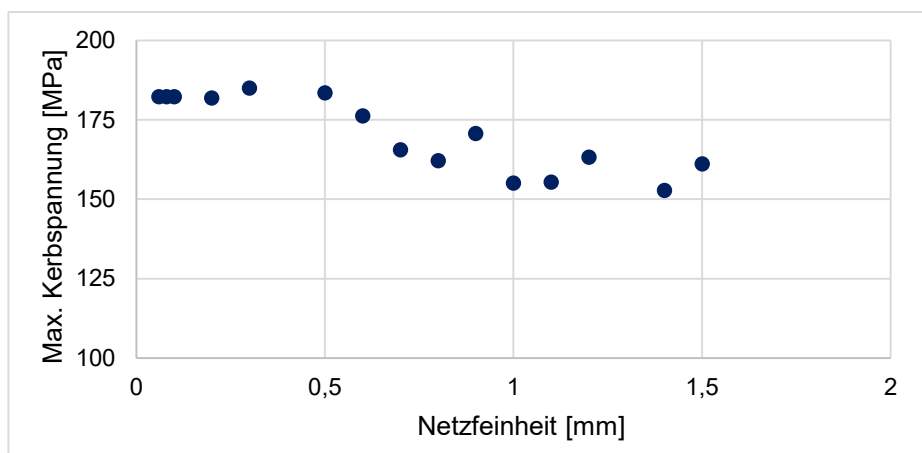


Bild 27-5: Sensitivitätsanalyse

Figure 27-5: Analysis of sensitivity

Blehdickeneinfluss im FE Modell

Der geometriebedingte Einfluss der Blechdicke wurde am Modell einer X-Naht getestet. Die Ausmaße der Naht entsprechen denen der oberen Naht des Referenzmodells. Es wurde eine Blechbreite von 0,1 mm und eine Elementgröße des Netzes von 0,12 mm gewählt. Die angreifende Last wurde immer so angesetzt, dass sich eine Nennspannung von 100 MPa ergeben hat. Die Ergebnisse sind graphisch in Bild 27-6 dargestellt. Es ist hier deutlich zu erkennen, dass die Veränderung der Dicke des Blechs von 4 mm auf 23 mm einen Anstieg der Kerbspannung von 172 MPa auf 202 MPa, also um 17 % bewirkt. Unabhängig von einer weiteren Steigerung der Blechdicke stagniert die Kerbspannung ab einer Blechdicke von 25 mm bei ungefähr 200 MPa.

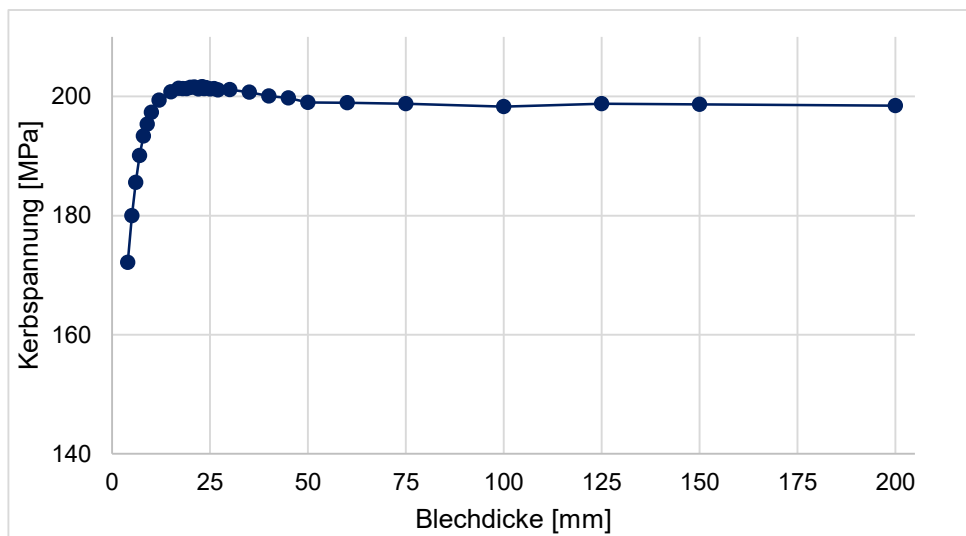


Bild 27-6: Blehdickeneinfluss in der FE

Figure 27-6: Influence of the plate thickness in FE

In der DIN EN 1993-1-9 [1] für Nennspannungskerbfälle wird der Dickeneinfluss des Blechs mit Hilfe des Abminderungsfaktors k_s (Formel (9.1)) berücksichtigt. Dieser wird jedoch erst ab einer Blechdicke von 25 mm angesetzt. Die IIW-Empfehlungen [16] geben als eine ergänzende Empfehlung für den Fall, dass die Naht blecheben abgeschliffen an, 0,1 statt 0,2 im Exponenten zu verwenden. Dies mindert die ertragbare Kerbspannung zwar weniger, geht aber nach wie vor davon aus, dass die Spannung mit zunehmender Blechdicke weiter zunimmt. Wird bei einer Schweißnaht ohne Nachbehandlung statt das Nennspannungskonzept das Kerbspannungskonzept zugrunde gelegt, gehen die IIW-Empfehlungen von einem Kerbfall 225 aus. Dies berücksichtigend, kann der Einfluss der Blechdicke auf die Ermüdungsfestigkeit, dargestellt Bild 27-7, mit Hilfe der Formel (27.5) berechnet werden. Dadurch werden die Werte von den Kerbspannungen in Nennspannungen übertragen. Die maximalen Kerbspannungen $\sigma_{k \max}$ wurden den vorangegangenen FE-Berechnungen entnommen.

$$\sigma_A = \frac{225}{\sigma_{k \max} / 100} \quad (27.5)$$

Ein Vergleich zwischen der normativen, numerischen und experimentellen Bewertung des Blehdickeneinflusses ist in Bild 27-7 gegeben.

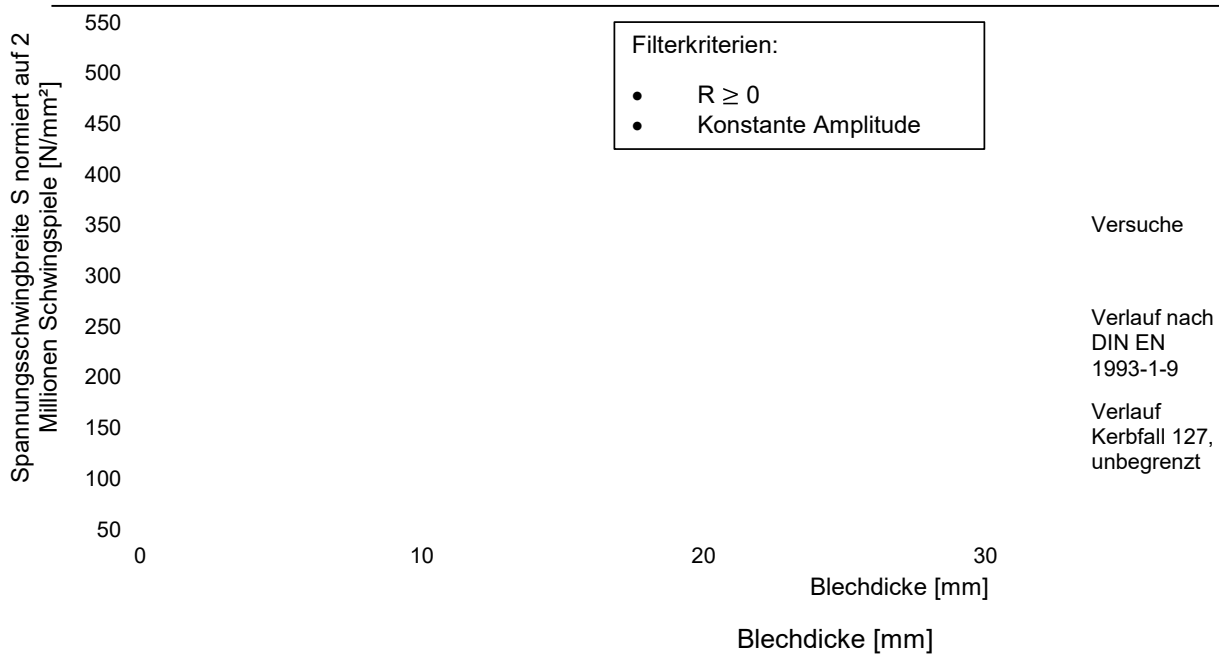


Bild 27-7: Blechdickeneinfluss normativ, numerisch und experimentell

Figure 27-7: Plate thickness effect, acc. to Eurocode, the FE model and experiments

Einfluss des Nahtanstiegs winkels

Um den Einfluss des Nahtanstiegs winkels zu überprüfen, wurde das gleiche Modell verwendet, wie bereits zur Untersuchung des Blechdickeneinflusses. Als Blechdicke wurden 20 mm gewählt. Zu Beginn wurde dem Referenzmodell entsprechend eine Nahtbreite von 11,5 mm gewählt. Weiterhin wurden die Nahtanstiegs winkel variiert und jeweils die maximalen Kerbspannungen berechnet. Dies ergab einen Verlauf, wie er in Bild 27-8 dargestellt ist.

Es ist deutlich erkennbar, dass eine Steigerung des Nahtanstiegs winkels von 0° auf 60° eine Steigerung der maximalen Kerbspannung um das 2,2-fache bewirkt. Dies bestätigt die Annahme, dass, je größer die Änderung in der Geometrie ist, wie in diesem Fall durch größer werdende Nahtanstiegs winkel, desto größer ist die Schwächung der Ermüdungsfestigkeit.

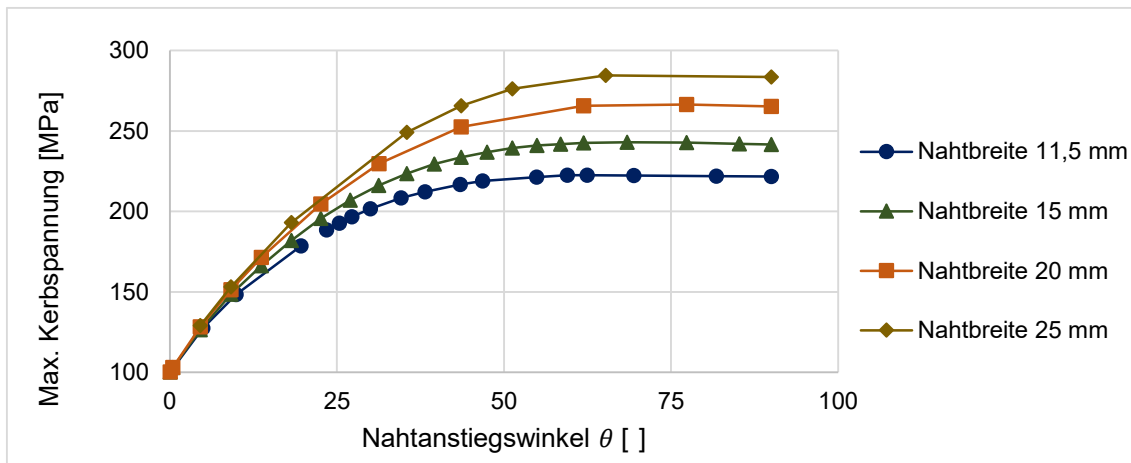


Bild 27-8: Kerbspannungen in Abhängigkeit des Nahtanstiegswinkels

Figure 27-8: Notch stress dependent on the weld toe angle

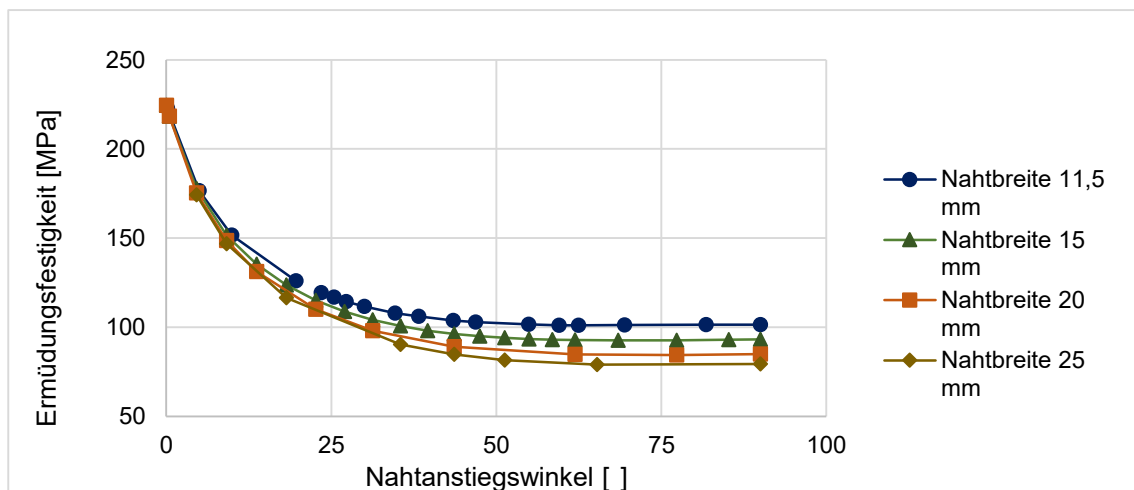


Bild 27-9: Ermüdungsfestigkeit in Abhängigkeit des Nahtanstiegswinkels

Figure 27-9: Fatigue strength dependent on the weld toe angle

Auch die Ermüdungsfestigkeit wurde mit Hilfe der Formel (27.5) berechnet und in Bild 27-9 dargestellt.

Ab 60° hat eine Erhöhung des Winkels jedoch keine weiteren Auswirkungen. Der Grund könnte darin liegen, dass bei großen Winkeln der Kraftfluss nicht so weit umgelenkt wird, dass er die volle Nahtüberhöhung ausnutzen könnte. Dies bestätigen auch die Ergebnisse der FE-Berechnungen, wie sie anschaulich in Bild 27-10 dargestellt sind. Für diesen Vergleich wurde die Nahtbreite beibehalten, während der Nahtanstiegswinkel deutlich gesteigert wurde.

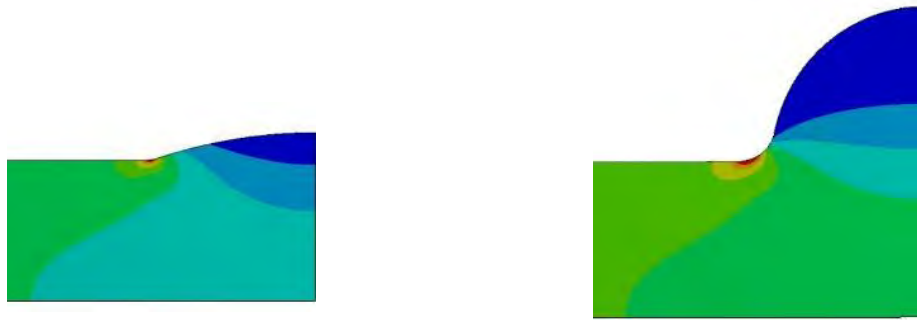


Bild 27-10: Geringer (a) und großer (b) Nahtanstiegswinkel

Figure 27-10: small (a) and large (b) weld toe angle

Das gleiche Verfahren wurde bei den Nahtbreiten 15 mm, 20 mm und 25 mm durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass der Verlauf bei den verschiedenen Nahtbreiten zwar ähnlich ist, der Effekt des Nahtanstiegswinkels jedoch mit zunehmender Nahtbreite deutlich größer wird. Bei einer Nahtbreite von 25 mm steigt die maximale Kerbspannung innerhalb der gleichen Spanne um das 2,8 fache an. Es ist jedoch auch zu bemerken, dass dieser Effekt erst ab einem Nahtanstiegswinkel von ca. 25° erkennbar wird und die Steigerung des Effekts mit zunehmender Nahtbreite kleiner wird. Während die maximale Kerbspannung von 15 mm Nahtbreite auf 20 mm Nahtbreite noch um 24 % steigt, sind es von 20 mm auf 25 mm Nahtbreite nur noch 18 %.

Bei einer Nahtüberhöhung von 6 mm erhöht sich die maximale Kerbspannung bis zu einem Nahtanstiegswinkel von ungefähr 25° um das 2,2 fache. Die identischen Werte während des Beginns der Kurven bei 2 mm und 6 mm Nahtüberhöhung deuten darauf hin, dass die Ermüdungsfestigkeit in diesem Bereich allein vom Nahtanstiegswinkel abhängig ist und die Nahtüberhöhung erst bei größeren Nahtanstiegswinkeln einen Einfluss hat.

Die Ergebnisse der FE-Berechnungen implizieren, dass der aus Nahtüberhöhung und Nahtbreite berechnete Nahtanstiegswinkel bis zu einem gewissen Grad einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Die Untersuchungen zeigen ebenfalls, dass die Nahtbreite (bei konstantem Schweißnahtanstiegswinkel) die Kerbspannung beeinflusst.

28 Anhang G – FE Modell zur Längssteife

Annex G – FE Model longitudinal stiffener

Bewertung des Längeneinflusses anhand einer FE Studie

Das numerische Modell wurde entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 26 modelliert und verifiziert. Für die Untersuchung des Längeneinflusses der Längssteife wurde die in Bild 28-1 dargestellte Geometrie genutzt.

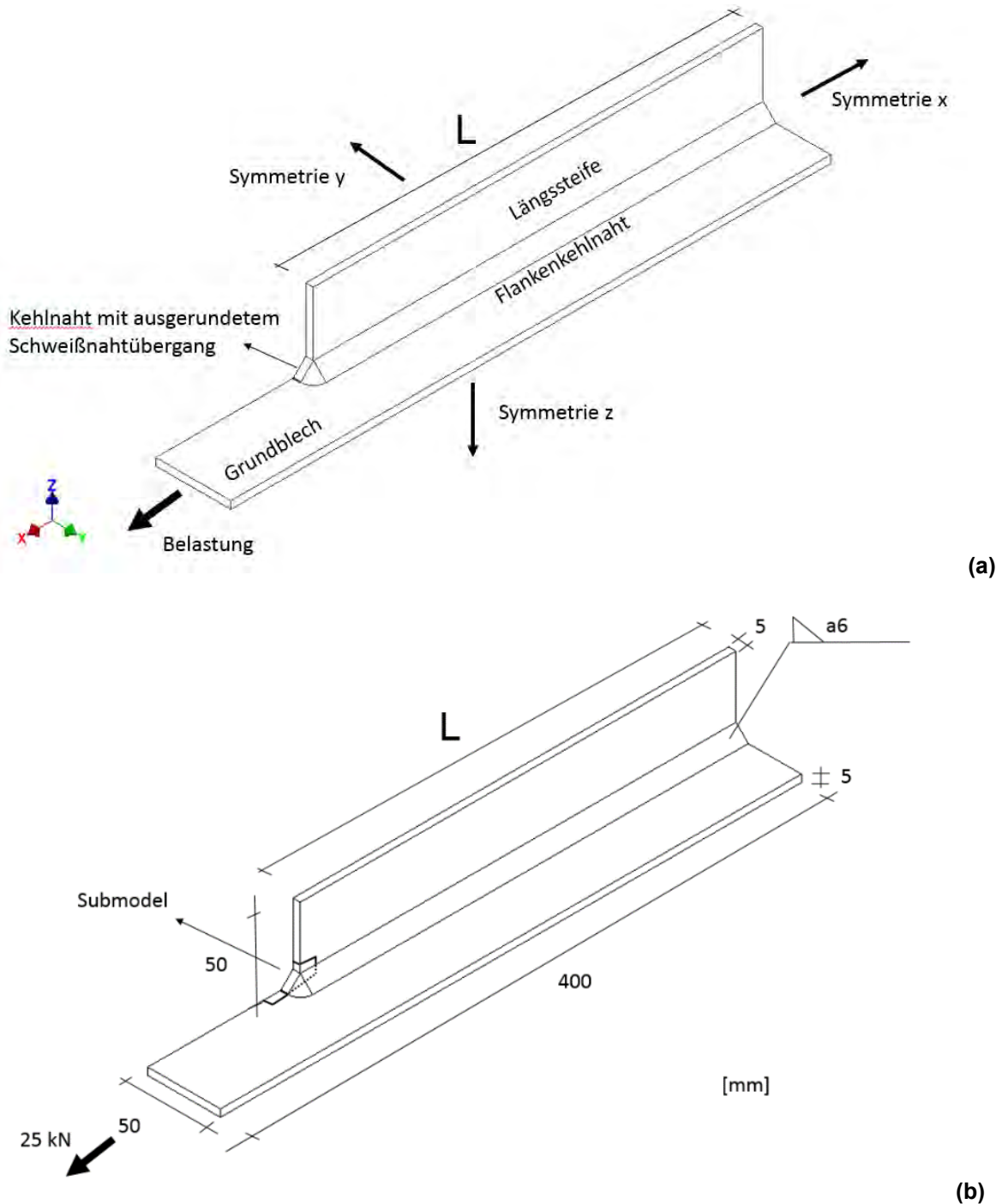


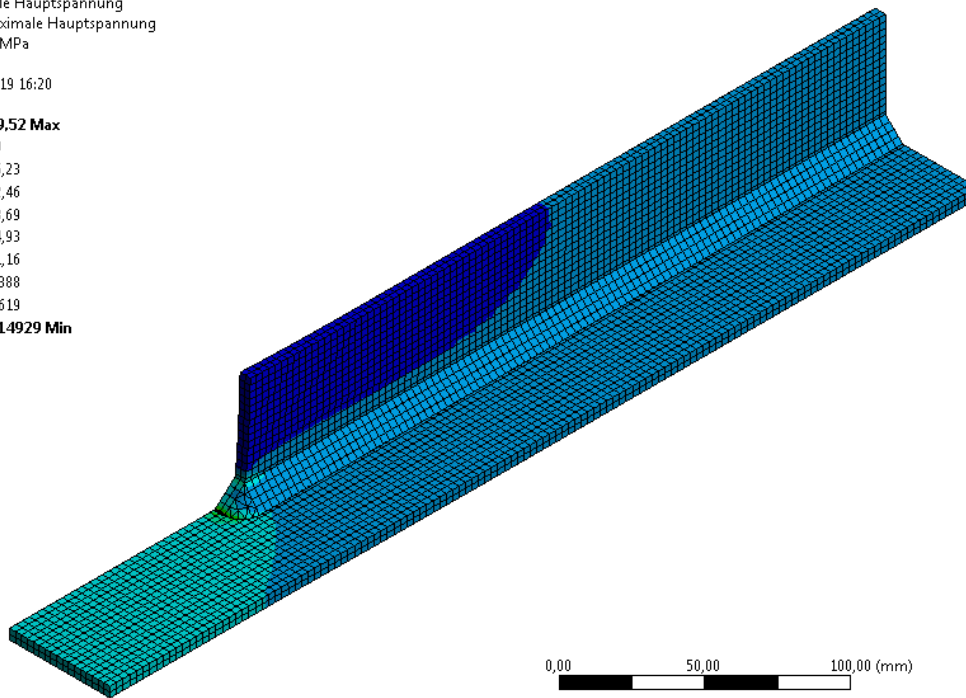
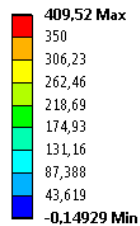
Bild 28-1: FE Modell der Längssteife (a) und Referenzgeometrie (b)

Figure 28-1: Finite element model of longitudinal attachment (a) with reference geometry (b)

Zur Verkürzung der Rechenzeit wurde die Submodelltechnik genutzt. Dafür wurde ein Ausschnitt (Submodell) aus dem in Bild 28-1 dargestellten Globalmodell herausgeschnitten und fein vernetzt. Als Randbedingungen wurden in das FE Modell die Ergebnisse aus dem Globalmodell übertragen. Im Zentrum des Submodells befindet sich der modellierte Schweißnahtübergang an dem der Spannungskonzentrationsfaktor abgelesen werden kann. Bild 28-2 zeigt das vernetzte Global- und Submodell.

B: Statisch-mechanische Analyse

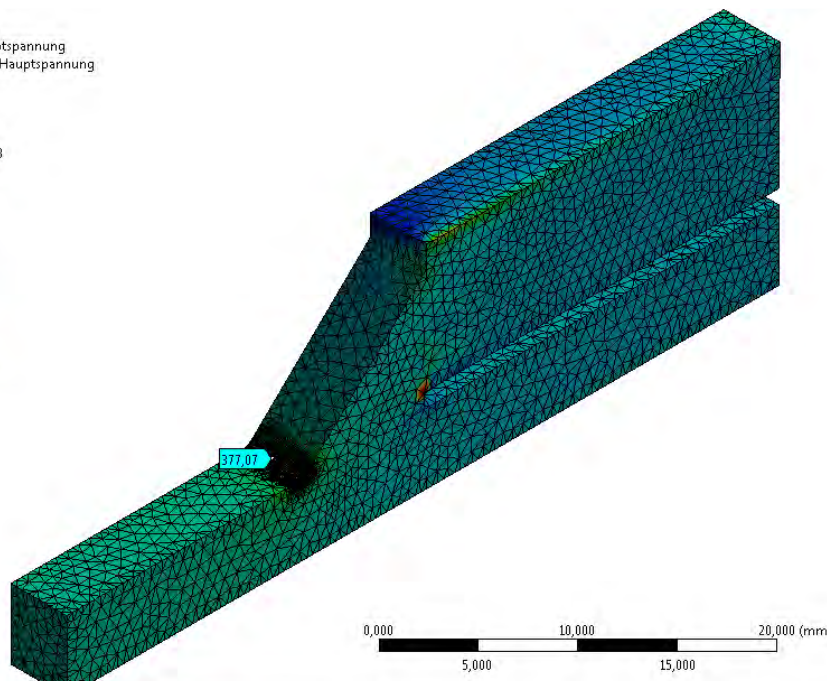
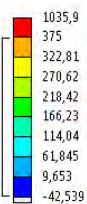
Maximale Hauptspannung
 Typ: Maximale Hauptspannung
 Einheit: MPa
 Zeit: 1
 15.01.2019 16:20



(a)

D: Submodell

Maximale Hauptspannung
 Typ: Maximale Hauptspannung
 Einheit: MPa
 Zeit: 1
 Max: 1035,9
 Min: -42,539
 15.01.2019 16:48



(b)

Bild 28-2: Globalmodell (a) und Submodell der Längssteife
Figure 28-2: Global model (a) and submodel (b) of longitudinal attachment

Insgesamt wurden 6 Modelle mit $L = 5 \text{ mm}$ bis $L = 300 \text{ mm}$ untersucht. Unter Berücksichtigung der Symmetrie wurden also Längssteifenlängen von 10 mm bis 600 mm untersucht. Die berechneten Spannungskonzentrationsfaktoren sind in Bild 28-3 in Abhängigkeit der Länge dargestellt.

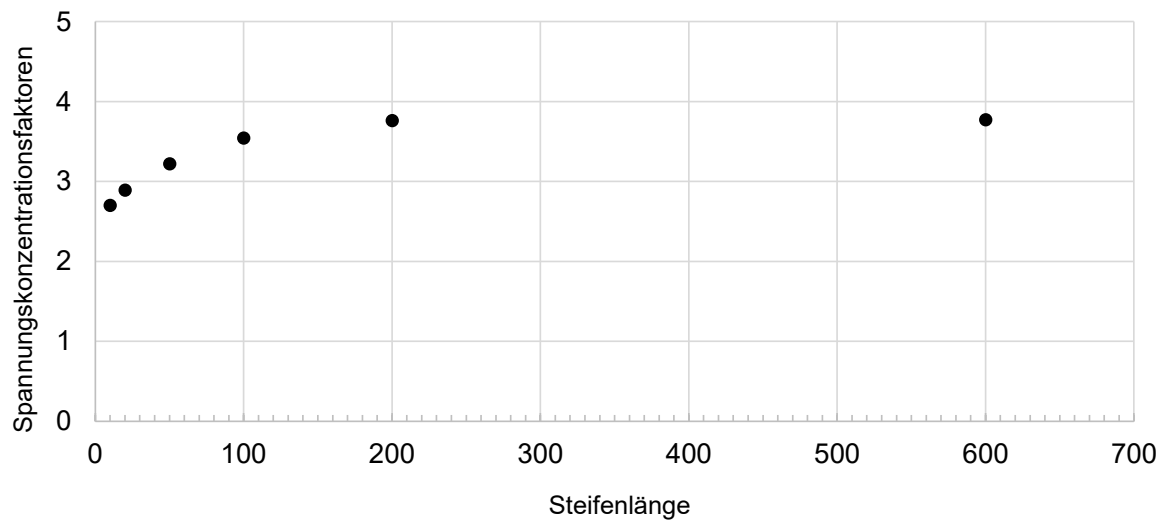


Bild 28-3: Spannungskonzentrationsfaktor β in Abhängigkeit der Steifenlänge

Figure 28-3: Notch factor β dependent on the attachment length

Unterstellt man den Spannungskonzentrationsfaktoren auf Grundlage des Kerbspannungskonzepts den Kerbfall 225, so können die ermittelten Kerbspannungsfaktoren direkt mit den Nennspannungskerbfällen im Eurocode 3-1-9 [1] verglichen werden, siehe Formel (28.1).

$$\Delta\sigma_c = \frac{225}{\beta} \quad (28.1)$$

Dabei ist:

$\Delta\sigma_c$: Nennspannungskerbfall, β : Spannungskonzentrationsfaktor, 225: Bezugswert der Kerbspannungswöhlerlinie

DASSt-Richtlinien

Stand: November 2019

Nr.	Titel	
001	Richtlinien für Verbindungen mit Schließringbolzen im Anwendungsbereich des Stahlhochbaus mit vorwiegend ruhender Belastung (2/70)	überholt durch Zulassungsregelung
002	Vorläufige Empfehlung zur Wahl der Stahlgütekategorien für geschweißte Stahlbauten (1/60)	ersetzt durch 009
003	Vorläufige Richtlinie für HV-Verbindungen (1963)	ersetzt durch 010
004	Vorläufige Empfehlungen für die Anwendung der elektrischen Widerstandspunktschweißung im Stahlbau (5/62)	überholt ersetzt durch Norm-Regelung
005	Ergänzung zu der vorläufigen Richtlinie für HV-Verbindungen für den Anwendungsbereich des Stahlhochbaus mit vorwiegend ruhender Belastung (3/67)	ersetzt durch 010
006	Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen im Stahlbau (1/80)	überholt durch 12/08
006	Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen im Stahlbau (12/08)	gültig
007	Lieferung, Verarbeitung und Anwendung wetterfester Baustähle (5/93)	gültig
008	Richtlinien zur Anwendung des Traglastverfahrens im Stahlbau (3/73)	überholt
009	Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten (05/05)	überholt durch 05/08
009	Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten (05/08)	gültig
010	Anwendung hochfester Schrauben im Stahlbau (6/76)	überholt
011	Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindeststreckgrenzenwerten von 460 und 690 N/mm ² - Anwendung für Stahlbauten (2/88)	nur noch als Hintergrundliteratur
012	Beulsicherheitsnachweise für Platten zusammen mit Kommentar zur DASSt-Richtlinie 012 - , DIN Grundlagen-Erläuterungen-Beispiele (10/78)	überholt
013	Beulsicherheitsnachweise für Schalen (7/80)	überholt

Nr.	Titel	
014	Empfehlungen zum Vermeiden von Terrassenbrüchen in geschweißten Konstruktionen aus Baustahl (1/81)	gültig
015	Träger mit schlanken Stegen (7/90), DIN	nur noch als Hintergrundliteratur
016	Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen (2/92)	nur noch als Hintergrundliteratur
017	Beulsicherheitsnachweise für Schalen - spezielle Fälle (Entwurf 10/92)	überholt
018	Hammerschrauben (11/01)	gültig
019	Brandsicherheit von Stahl- und Verbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden (11/01)	gültig
020	Bemessung schlanker stählerner windbelasteter Kreiszyinderschalen (05/08)	gültig
021	Schraubenverbindungen aus feuerverzinkten Garnituren M 39 bis M 72 entsprechend DIN EN 14399-4, DIN EN 14399-6 (09/13)	gültig
022	Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen / Hot-dip-zinc-coating of load-bearing steel components (06/16)	gültig
023	Langlochverbindungen mit Schrauben	gültig
024	Anziehen von geschraubten Verbindungen der Abmessungen M12 bis M36 (06/18)	gültig
025	Ergänzende Kerbfalleinstufung von Obergurt-Stegblechanschlüssen von Kranbahnträgern mit besonderer Schweißnahtausführung (01/19)	gültig
026	Ermüdungsbemessung bei Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren (03/19)	gültig
103	Nationales Anwendungsdokument (NAD) für DIN V ENV 1993 Teil 1-1, (11/93)	überholt
104	Nationales Anwendungsdokument (NAD) für DIN V ENV 1994 Teil 1-1, (2/94)	überholt

Preise auf Anfrage

Forschungsberichte

Nr.	Titel
1/2004	Ankerplatten und Einbaudetails zur Kraftübertragung im Stahlbau
2/2004	15. DAST-Forschungskolloquium
1/2005	Entwicklung und Anwendung von Planungssoftware zur brandschutztechnischen Optimierung von Stahlgeschossbauten
2/2005	Entwicklung von Abreißverbindungen von Stahlkonstruktionen an Brandwänden
3/2005	Mittragende Betongurtbreite niedriger Verbundträger
4/2005	Bemessung stabilitätsgefährdeter, gevouteter Kragträger mit T-förmigen Querschnitt und Stegausschnitten aus ferritischem Stahl und gevouteten Kragträgern mit T-förmigem Querschnitt aus austenitischen nichtrostenden Stählen (Edelstahl Rostfrei)
5/2005	Korrelationsbedingter Flächeneffekt der Windersatzlasten und die Auswirkung auf die Tragwerksreaktionen
6/2005	Ermüdungsverhalten von Betondübeln
1/2006	16. DAST-Kolloquium
2/2006	Realitätsnahe Bestimmung der Tragfähigkeit beul- und biegedrillknick-Gefährdeter dünnwandiger Stahlquerschnitte
3/2006	Einsatz überlanger Schrauben zur Verbundsicherung bei Verbundträgern aus Normal- und Leichtbeton
4/2006	Werkstoffwahl im Stahlbrückenbau
1/2007	Abgrenzung des Anwendungsbereiches von Dächern nach DIN 18234
2/2007	Stahl-Glas-Verbindungen im Hinblick auf die Normung
3/2007	Einsatz von hochfesten Stählen und Betonen bei Hohlprofil-Verbundstützen
4/2007	Feststellung zulässiger Restspalte beim Schweißen
5/2007	Kranbahnträger – Wirtschaftliche Bemessung und Konstruktion robuster Radlasteinleitungen
1/2008	Entwicklung und Aufbereitung wirtschaftlicher Bemessungsregeln für Stahl- und Verbundträger mit schlanken Stegblechen im Hoch- und Brückenbau
2/2008	Duktilitätskriterien für Typisierte Stirnplattenverbindungen

Nr.	Titel
1/2009	Effiziente Nachweisführung von biegeknickgefährdeten, dünnwandigen Stahlquerschnitten
2/2009	Vereinfachte und einheitliche Stabilitätsnachweise für Bauteile aus Einscheiben- und Verbundscheibengläsern für Druck und Biegung
2/2009	Vereinfachte und einheitliche Stabilitätsnachweise für Bauteile aus Einscheiben- und Verbundscheibengläsern für Druck und Biegung
3/2009	Entwicklung eines Bemessungsmodells für geschraubte, momententragfähige Kopfplattenverbindungen mit 4 Schrauben in einer Schraubenreihe auf der Grundlage der prEN 1993-1-8:2003
1/2010	Tragende Scheiben-Elemente aus Stahl-Glas-Verbund
2/2010	Untersuchung des Einflusses konstruktiver Maßnahmen bezüglich der Sicherungseigenschaften gegen Lockern und Losdrehen von planmäßig vorgespannten HV-Schraubenverbindungen unter zyklischer Beanspruchung
4/2010	Gelenkige Sekundärträgeranschlüsse mit langen Fahnenblechen im Verbundbau
3/2010	Querkrafttragfähigkeit von Slim-Floor Trägern – Entwicklung eines neuen Bemessungsansatzes zur Berücksichtigung der Betontragfähigkeit
5/2010	Optimierte Windlastansätze auf der Basis einer realistischen und praxisorientierten Erfassung flächen- und längenkorrelierter Effekte infolge dynamischer Lastanteile
1/2011	Weiterentwicklung und Spezifizierung der Ermüdungsnachweise für Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Stahl
3/2011	Ergänzende Untersuchungen zur Bewertung zulässiger Restspalte zur Überführung in technische Regeln
4/2011	Standartlösungen für punktförmig gelagerte Verglasungen – Ermittlung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit
1/2013	Vereinfachtes Bemessungsverfahren geschraubter Stirnplattenanschlüsse nach DIN EN 1993-1-8
3/2013	Verbesserung der Tragfähigkeit von Ankerplatten mit angeschweißten Kopfbolzen in stabförmigen Stahlbetonbauteilen
1/2014	Ermüdungsfestigkeit von Montagestößen in Vollwandträgern mit dicken Gurten
2/2014	Verbesserung der Tragfähigkeit von Ankerplatten mit angeschweißten Kopfbolzen in stabförmigen Stahlbetonbauteilen
3/2014	Optimierter Einsatz intumeszierender Anstriche im Stahlbau

Nr.	Titel
4/2014	Ermittlung von Drehfedersteifigkeiten von Stahlbauanschlüssen zur Bestimmung des idealen Biegedrillknickmomentes
5/2014	Schweißen von kaltumgeformten Bauteilen – Kriterien für die Werkstoffauswahl
2/2015	Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile
3/2015	Dauerhaftigkeit und Dimensionierung des Randverbundes von Mehrscheibenisolierverglas in Abhängigkeit der Klimabelastung bei Zweifach- und Dreifachisolierverglas - DuraSeal
1/2016	Außergewöhnliche Bemessungssituationen nach DIN EN 1991-1-7 – Effektive Anwendung und Bemessungsstrategien für Stahl- und Verbundrahmentragwerke
1/2017	Große Ankerplatten mit Kopfbolzen für hochbeanspruchte Konstruktionen im Industrie- und Anlagenbau
2/2017	Untersuchungen zum Tragverhalten von hochfesten Schrauben unter kombinierter Zug- und Scherbeanspruchung
3/2017	Allgemeines Verfahren zum Nachweis gegen Stabilitätsversagen aus der Haupttragebene (ALLVER)
4/2017	Beulen mehrachsiger beanspruchter Platten
5/2017	Modell zur Erfassung der Rissbreiten bei durchlaufenden Stahlverbundträgern mit Teil- und Ganzfertigteilen
1/2018	Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren
2/2019	Interaktionsbeziehungen für Normalkraft, Biegemomente und Torsion: Harmonisierung und Ergänzung der Stabilitätsnachweise für Stäbe mit Standard-Walzprofilen
4/2019	Neubewertung und Erweiterung des Kerbfallkatalogs nach Eurocode 3 für eine zukunftsfähige Auslegung hochbeanspruchter Stahlkonstruktionen

Preise auf Anfrage

Herausgeber:
 Deutscher Ausschuss für Stahlbau DAST
 Vertrieb:
 Stahlbau Verlags- und Service GmbH,
 Postfach 10 51 45
 D-40042 Düsseldorf
 Tel.: 0211/67078-01
 Fax: 0211/67078-21

Forschungsberichte Stand: November 2020

Homepage: www.deutscherstahlbau.de
 Shop: <https://shop.deutscherstahlbau.de>
 E-Mail: contact@deutscherstahlbau.de

Berichte von 1973 - 2004

Titel	Berichtsheft / Autor	Erläuterungen
Abschlußberichte	1/1973	
<ul style="list-style-type: none"> • Versuche zur Kippsicherheit von durchlaufenden Pfetten mit leichter Dacheindeckung • Traglastversuch an durchlaufenden U-Pfetten mit Aluminium-Trapezblechen als Dacheindeckung • Traglastversuch an durchlaufenden Pfetten mit Leichtbetonplatten als Dacheindeckung • Das Stabilitätsproblem des in Höhe des oberen Flansches wirklichkeitsnah belasteten I-Trägers • Traglastversuche im überkritischen Bereich zur Entwicklung eines wirklichkeitsnäheren Berechnungsverfahrens für Leichtmetall-Vollwandträger • Versuche zur Feststellung des Einflusses verschiedener Zwischenanstriche auf den Berührungsfächen von Nietverbindungen aus St 52 • Regelan schlüsse im Stahlhochbau - Teil I: Traglastversuche an durch Querkraft beanspruchte Winkelanschlüsse mit rohen Schrauben • Einfluß der exzentrischen Lage von Wendeln auf die Tragfähigkeit von Kopfbolzendübeln • Dauerversuche mit einseitig geschweißter Stumpfnah in V-Form auf Keramik-Unterlage • Dauerfestigkeitsversuche mit stumpfgestoßenen, in Normalgüte CO₂-geschweißten Stäben • Statische Versuche mit Verbindungen von Aluminium-Konstruktionen 	<p>Peilkan</p> <p>Oxford / Hildenbrand</p> <p>Oxford / Hildenbrand</p> <p>Fischer</p> <p>Steinhardt</p> <p>Hoffmann</p> <p>Oxford</p> <p>Roik / Lindner</p> <p>Hoffmann</p> <p>Hoffmann</p> <p>Seinhardt / Valtinat</p>	

<p>Abschlussberichte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dauerfestigkeitsversuche mit brenngeschnittenen Proben aus St 52-3 • Stabilitätsverhalten gedrückter Gurte von Blechträgern • Traglasten von auf Biegung und Torsion beanspruchten Stäben unter Berücksichtigung des plastischen Werkstoffverhaltens • Untersuchung der Tragfähigkeit von Stahlkonstruktionen mit ebenen, scheibenartig beanspruchten Blechen mittels wirklichkeitsnaher Großversuche (Plattenbeulprogramm) • Beiträge zum Beulproblem bei Kastenträgern <ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsbetrachtung beim Beulen von Kastenträgern • Kurzreferate und Inhaltsangaben zu den Vorträgen der Fachsitzung I, Deutscher Stahlbautag 1974 • Folgerungen aus den Schadensfällen im In- und Ausland • Der Merrison-Bericht und weiterführende Untersuchungen in Großbritannien • Neue Erkenntnisse und Theorien aus europäischen Forschungsarbeiten • Berechnungsmodelle für ausgesteifte Kastenträger • Aus der Arbeit des DAST-Unterausschusses „Stabilität“ und seiner Arbeitsgruppe „Plattenbeulen“ • Ermittlung des Reibungswertes μ zwischen Betonfertigteilen und Stahlunterlage • Zur Sprödbruchsicherheit von verzinkten und unverzinkten Stahlbauteilen mit gestanzten Löchern • Abwüργeversuche an feuerverzinkten und schwarzen HV-Schrauben • Verbindungen mit Schließringbolzen im Anwendungsbereich des Stahlhochbaues mit vorwiegend ruhender Belastung • Tragverhalten von Schließringbolzenverbindungen in schwingend beanspruchten Stahlkonstruktionen • Biegesteife HV-Kopfplattenverbindungen (Regelanschlüsse im Stahlhochbau Teil I) • Verbindungen hochfester Stähle mit hochfesten Schrauben • Dauerfestigkeit von querbeanspruchten Stumpfnähten mit kreuzenden Strichraupen • Zusammenwirken von Stumpfnähten mit HV-Schrauben und Nieten bei ruhender und bei Dauerbelastung 	<p>2/1975</p> <p>Hoffmann Barbré Roik / Lindner</p> <p>Barbré / Jungbluth / Roik / Scheer / Steinhardt</p> <p>Dubas</p> <p>Roik Godfrey</p> <p>Massonnet</p> <p>Steinhardt Scheer</p> <p>Roik</p> <p>Martin</p> <p>Steinhardt / Valtinat Steinhardt / Valtinat</p> <p>Steinhardt / Valtinat</p> <p>Steinhardt / Valtinat</p> <p>Hoffmann</p> <p>Aurnhammer / Hoffmann</p>
--	--

<p>Beiträge zum Beulproblem bei Kastenträgerbrücken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einführung • Folgerungen aus den Schadensfällen im In- und Ausland • Der Merrison-Bericht und weiterführende Untersuchungen in Großbritannien • Neue Erkenntnisse und Theorien aus europäischen Forschungsarbeiten • Berechnungsmodelle für ausgesteifte Kastenträger • Aus der Arbeit des DAST-Unterausschusses „Stabilität“ und seiner Arbeitsgruppe „Plattenbeulen“ 	<p>3/1975,</p> <p>Hoffmann Roik Godfrey</p> <p>Massonet</p> <p>Steinhardt Nölke</p>	<p>Vorträge aus der Fachsitzung I des Deutschen Stahlbautages Hamburg 1974 Leitung: Roik</p>
<p>Beiträge zum Tragverhalten und zur Sicherheit von Stahlkonstruktionen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorwort und Einführung • Zur Berechnung und Konstruktion druckbeanspruchter Schalen aus Stahl • Zum Stabilitätsverhalten von Trägern im Stahlhochbau • Zum Tragverhalten und Einsatz von Trapezprofilblechscheiben • Der wahrscheinlichkeitstheoretische Aspekt der Bauwerkssicherheit im Stahlbau • Grundgedanken zur Bemessung stählerner Eisenbahnbrücken auf Betriebsfestigkeit vor wahrscheinlichkeitstheoretischem Hintergrund <p>Rohrsandwichbrücken aus Stahl Ein neuer Brückentyp für mittlere Spannweiten</p>	<p>4/1977</p> <p>Jungbluth Bornscheuer</p> <p>Oxford Fischer Petersen</p> <p>Siebke</p>	<p>Vorträge aus der Fachsitzung II des Deutschen Stahlbautages Stuttgart 1976</p>
<p>Rohrsandwichbrücken aus Stahl Ein neuer Brückentyp für mittlere Spannweiten</p>	<p>5/1977</p> <p>Jungbluth, Bode</p>	<p>Berichte aus dem Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr- Universität Bochum, und dem Institut für Statik und Stahlbau, Technische Hochschule Darmstadt</p>

Berichte von 1915 - 1969

Titel	Jahr	
Der Einfluß der Nietlöcher auf die Längenänderung von Zugstäben und die Spannungsverteilung in ihnen	Ausgabe A, Heft 1, 1915 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
Zur Einführung - Bisherige Versuche	Ausgabe B, Heft 1, 1915 Kögler	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
Versuche zur Prüfung und Abnahme der 3000 t-Maschine	Ausgabe A, Heft 2, 1920 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
	Ausgabe B, Heft 2	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche mit Anschlüssen steifer Stäbe	Ausgabe A, Heft 3, 1921 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
	Ausgabe B, Heft 3	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
	Ausgabe A, Heft 4	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche zur Ermittlung der Knickspannungen für verschiedene Baustähle	Ausgabe B, Heft 4, 1930 Rein	Berichte des Ausschusses für Versuche im Stahlbau
	Ausgabe A, Heft 5	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Dauerversuche mit Nietverbindungen	Ausgabe B, Heft 5, 1935 Graf	Berichte des Ausschusses für Versuche im Stahlbau
	Ausgabe A, Heft 6	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Untersuchungen über die Knickfestigkeit von gestoßenen Stützen mit plangefrästen Stoßflächen und nur teilweiser Stoßdeckung (Kontaktstöße) bei mittlerer und außermittiger Belastung	Ausgabe B, Heft 6, 1936 Bierett, Grüning	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 7	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Über das Verhalten geschweißter Träger bei Dauerbeanspruchung unter besonderer Berücksichtigung der Schweißspannungen	Ausgabe B, Heft 7, 1937 Bierett	Berichte des DAST

	Ausgabe A, Heft 8	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche über den Einfluß der Gestalt der Enden von aufgeschweißten Längsriegeln in Zuggliedern und von aufgeschweißten Gurtverstärkungen an Trägern	Ausgabe B, Heft 8, 1937 Graf	Berichte des DAST
Aus Untersuchungen mit Leichtfahrbahndecken zu Straßenbrücken	Ausgabe A, Heft 9 Ausgabe B, Heft 9, 1938 Graf	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden. Berichte des DAST
Untersuchungen zur Ermittlung günstiger Herstellungsbedingungen für die Bauteillängsriegel geschweißter Brückenträger	Ausgabe A, Heft 10 Ausgabe B, Heft 10, 1940 Bierett	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden. Berichte des DAST
Versuche und Feststellungen zur Entwicklung der geschweißten Brücken	Ausgabe A, Heft 11 Ausgabe B, Heft 11, 1940 Graf	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden. Berichte des DAST
Versuche mit Nietverbindungen	Heft 12, 1941	Berichte des DAST
Einfluß der Nahtform und der Schweißausführung auf die Querverspannung beim Schweißen unter Einspannung	Heft 13, Albers	Berichte des DAST
Versuche über das Verhalten von geschweißten Trägern unter oftmals wiederholter Belastung	Heft 14, 1942 Graf	Berichte des DAST
Versuche mit geschweißten Trägern zur Beurteilung der Eignung der verwendeten Werkstoffe und der Art der Herstellung der Träger. Prüfung der Werkstoffe mit dem Nutzwinkelbiegeversuche und mit dem Kerbschlagbiegeversuche	Heft 15, 1943 Graf	Berichte des DAST
Versuche mit Schraubverbindungen	Heft 16, 1951 Graf	Berichte des DAST
Versuche über die Widerstandsfähigkeit von geschweißten Querträgeranschlüssen bei oftmals wiederholter Biegebelastung	Heft 17, 1952 Graf / Munzinger	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	1. Teil, Heft 18, 1954 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
Versuche an Verbundträgern	Heft 19, 1956 Graf / Brenner	Berichte des DAST
Thermodynamik des Sprödbruches und ihre Anwendung im Stahlbau	Heft 20, 1957 Kuntze	Berichte des DAST

Thermodynamik des Sprödbrechens und ihre Anwendung im Stahlbau	2. Teil, Heft 20a, 1959 Kuntze	Berichte des DAST
Der Feuerschutz im Stahlnhochbau insbesondere von Stahlstützen	Heft 21, 1959 Boué	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben	II. Teil, Heft 22, 1959 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
Untersuchungen zur Anwendung der elektrischen Widerstandspunktschweißung im allgemeinen Stahlbau	1. Teil, Heft 23, 1960, Bierett, Steinhardt	Berichte des DAST
HV-verschraubte Kopplattenverbindungen bei biegefesten Stabwerken	Vorabdruck aus Heft 24 1961 Steinhardt, Schlaginhaufen	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	III. Teil, Heft 24, 1962 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	IV. Teil, Heft 25, 1969 Steinhardt, Möhler, Valtinat	Berichte des DAST

