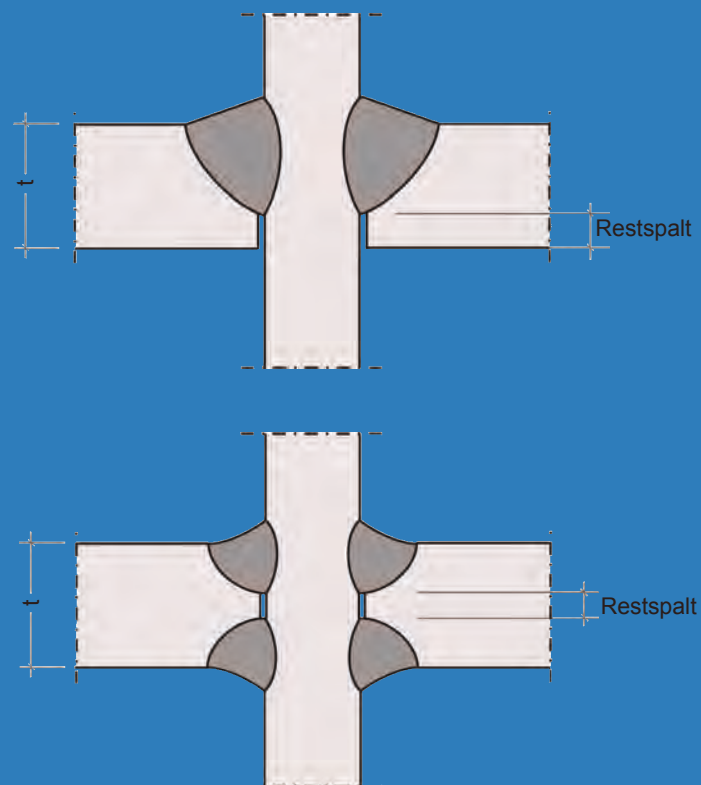


3/2011

Forschungsbericht

Ergänzende Untersuchungen zur
Bewertung zulässiger Restspalte
zur Überführung in technische
Regeln



ISBN 978-3-941687-29-5

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

3/2011

Forschungsbericht

**Ergänzende Untersuchungen
zur Bewertung zulässiger Rest-
spalte zur Überführung in
technische Regeln**

**RWTH Aachen
Institut Stahlbau
Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau**

**GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH
Niederlassung SLV Duisburg**

**Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann
Dipl.-Ing. Björn Eichler
Dipl.-Ing. Helmut Schmeink**

Stahlbau Verlags- und Service GmbH

Forschungsvereinigung

**Deutscher Ausschuß für Stahlbau e.V.
DAS**t

Forschungsstelle

**RWTH Aachen
Institut Stahlbau
Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau**

**GSI – Gesellschaft für Schweißtechnik
International mbH
Niederlassung SLV Duisburg**

IGF-Nummer

16175N

DASt-Homepage

www.stahlbauforschung.de



Vorwort

Das Forschungsprojekt wurde gemeinsam mit der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV Duisburg durchgeführt.

Das IGF-Vorhaben 16175 der Forschungsvereinigung Deutscher Ausschuss für Stahlbau – DAST wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Betreut wurde das Projekt durch den Deutschen Ausschuss für Stahlbau (DAST). Projektbegleitend wurden die Untersuchungsergebnisse unter der Leitung von Herrn Hüller halbjährlich dem Betreuungsausschuss, bestehend aus den Mitgliedern des DSTV-Arbeitsausschuss Fertigung, vorgestellt und die weiteren Arbeitsschritte diskutiert. Für die wertvollen praxisnahen Hinweise der Mitglieder sind die Autoren sehr dankbar.

Besonderen Dank geht an die Fa. Züblin Stahlbau GmbH, die das Vorhaben mit der Bereitstellung von Blechen und geschweißten Versuchskörpern unterstützt hat.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anlass und Aufgabenstellung	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	4
1.2.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	4
1.2.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	4
1.2.3	Methodischer Ansatz	4
1.3	Ergebnis	4
2	Theoretische Grundlagen	6
2.1	Aktuelle Normensituation	6
2.1.1	Europäische Normenlage (EN 1090-2:2008-12)	7
2.1.2	Nationale Normenlage (DIN 18800-7:2008-11).....	9
2.1.3	Schlussfolgerungen	9
2.1.4	Nicht vorwiegend ruhend beanspruchte Schweißverbindungen.....	9
2.2	Bruchmechanische Grundlagen.....	10
2.2.1	Linear-Elastische Bruchmechanik (K-Konzept).....	10
2.2.2	Elastisch-plastische Bruchmechanik.....	13
2.2.3	Rissfortschritt.....	13
2.3	Nachweiskonzept zur Vermeidung von Sprödbbruch	15
2.4	Bestimmung von $t_{8/5}$ -Zeiten	19
2.4.1	Rechnerische Herleitung der $t_{8/5}$ -Zeit	20
2.4.2	Experimentelle Ableitung der $t_{8/5}$ -Zeit.....	22
3	Experimentelle Untersuchungen	24
3.1	Herstellung von Schweißnähten mit kontrollierten Zähigkeitseigenschaften durch Probeschweißungen	25
3.1.1	Herstellung der Probekörper.....	25
3.1.2	Versuchsdurchführung – Teil 1	26
3.1.2.1	Schweißen der Bleche und $t_{8/5}$ -Zeit-Messung	26
3.1.2.2	Vergleich der gemessenen und experimentell bestimmten Werte der $t_{8/5}$ -Zeiten	28
3.1.3	Versuchsdurchführung – Teil 2	31
3.1.3.1	Zähigkeitsuntersuchungen.....	31
3.1.3.2	Ergebnisse	32
3.1.4	Schlussfolgerungen	34
3.2	Hauptversuchsprogramm an Kreuz- und Stumpfstoßverbindungen.....	36
3.2.1	Materialcharakterisierung der Proben DHY-N1 – DHY-N7	37

3.2.1.1	Chemische Analyse	37
3.2.1.2	Metallographie	38
3.2.1.3	Zugversuche	38
3.2.1.4	Kerbschlagbiegeversuche	41
3.2.1.5	Bruchmechanische Rissfortschrittsversuche	42
3.2.1.6	Härteuntersuchungen	46
3.2.2	Grundmaterial der Proben DHY-N1-2 – DHY-N6-2	47
3.2.3	Bauteilversuche	47
3.2.3.1	Rissfortschrittsversuche	48
3.2.3.2	Quasistatische Zugversuche bei tiefer Temperatur	49
3.3	Versuchsergebnisse	50
3.3.1	Kreuzstoßverbindungen DHY-N1 und DHY-N2	50
3.3.2	Stumpfstoßverbindungen DHY-N4 und DHY-N5	50
3.3.3	Diskussion der vorläufigen Ergebnisse	50
3.3.4	Kreuzstoßverbindungen DHY-N1-2 und DHY-N2-2	51
3.3.5	Stumpfstoßverbindungen DHY-N4-2 und DHY-N6-2	51
3.3.6	Zusammenfassung	52
4	Bruchmechanische Untersuchungen an Stumpfstoßverbindungen	53
4.1	Grundlagen zur numerischen Bestimmung von Spannungsintensitätsfaktoren	54
4.1.1	Boundary-Element-Methode (BEM)	54
4.1.2	BE-Software BEASY	54
4.1.3	BE-Modellierung	55
4.2	Numerische Voruntersuchungen	56
4.2.1	Allgemeines	56
4.2.2	Referenzmodell	56
4.2.3	Konvergenzuntersuchungen	57
4.2.4	Einfluss der qualitativen Nahtausführung	58
4.2.5	Einfluss der Bauteilbreite w	61
4.2.6	Handrechenformeln nach Murakami	63
4.2.6.1	DHY-Naht	64
4.2.6.2	HY-Naht	64
4.2.7	Vergleich der numerisch ermittelten Ergebnisse und der Handrechenformeln	65
4.2.8	Validierung hinsichtlich Rissfortschritt	66
4.2.9	Einfluss von weiteren Oberflächendefekten	68
4.2.10	Berücksichtigung von Exzentrizitäten	68
4.2.10.1	Voruntersuchungen	69
4.2.10.2	Spannungsintensitätsfaktoren unter Berücksichtigung exzentrischer Schweißung	71
4.2.10.3	Einführung des Vergrößerungsfaktor k_m	72
4.2.10.4	Schlussfolgerungen	75

4.2.11 Aus den Voruntersuchungen abgeleitete Schlussfolgerungen	75
4.3 Parameterstudie.....	76
4.4 Fazit.....	77
5 Rechnerische Ableitung zulässiger Restspalte für Stumpfstoßverbindungen	79
5.1 Bemessungssituation.....	79
5.1.1 Lastkombination	79
5.1.2 Beeinflussung der Tragsicherheit durch weitere Defekte	80
5.1.3 Inhomogenität der Materialzähigkeit über die Erzeugnisdicke	81
5.2 Nachrechnung der Spröbruchversuche	81
5.2.1 Vergleich der Versagenskenngößen auf Basis gemessener Materialkennwerte für f_y und T_{27J}	81
5.2.2 Vergleich der Versagenskenngößen auf Basis von Normwerten für f_y und T_{27J}	83
5.2.3 Schlussfolgerungen	84
5.3 Ableitung zulässiger Restspalte.....	84
5.3.1 Vorgehen.....	84
5.3.2 Berechnungsbeispiel	86
5.3.3 Zulässige Restspalte für Stumpfstoße mit DHY-Schweißnaht	87
5.3.3.1 Vorwiegend ruhende Beanspruchung	88
5.3.3.2 Nicht ruhende Beanspruchung	88
5.3.4 Zulässige Restspalte für Stumpfstoße mit HY-Schweißnaht	89
5.3.4.1 Vorwiegend ruhende Beanspruchung	89
5.3.4.2 Nicht ruhende Beanspruchung	89
5.4 Schlussfolgerungen	89
6 Restspaltdetektion.....	91
6.1 Allgemeines.....	91
6.2 Ultraschallverfahren zur Restspaltnessung	92
6.2.1 Klassische Ultraschallmessungen auf Basis von Randwellen	92
6.2.2 Phased-Array-Verfahren.....	95
6.3 UT-Vermessung der Restspalte.....	96
6.3.1 Messergebnisse an Kreuzstoßverbindungen	97
6.3.2 Messergebnisse an Stumpfstoßverbindungen	98
6.3.3 Zusammenstellung der Messergebnisse	101
6.4 Vergleich der aus den UT-Messungen und den Bruchflächen ermittelten Restspalltlängen	102
6.4.1 Herkömmliche UT-Messungen mit modifizierten Schallköpfen.....	102

6.4.2	Ultraschallmessungen mit der Phased-Array-Methode	104
6.4.2.1	Auswertung der Bruchflächen.....	105
6.4.2.2	Vergleich mit MT-Messungen	106
6.4.2.3	Ableitung eines für die Ultraschallmessung notwendigen Vorhaltemaßes Δ	107
6.5	Zusammenfassung	108
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	111
7.1	Zusammenfassung	111
7.2	Ausblick.....	111
8	Literaturverzeichnis.....	115
Anhang A	Probeschweißungen	A-1
Anhang A.1	Schweißanweisung Züblin Stahlbau GmbH.....	A-3
Anhang A.2	Materialzeugnisse.....	A-5
Anhang A.3	Schweißparameter.....	A-11
Anhang A.4	Monitoring von Schweißstrom und – spannung.....	A-13
Anhang A.5	Analytische Bestimmung der $t_{8/5}$ -Zeiten	A-15
Anhang A.6	Makroschliffe	A-17
Anhang B	Hauptversuche	B-1
Anhang B.1	Materialzeugnisse für die Proben DHY-N1 bis DHY-N7.....	B-3
Anhang B.2	Materialzeugnisse für die Proben DHY-N1-2 bis DHY-N6-2B-7	
Anhang B.3	Metallographische Untersuchungen.....	B-10
Anhang B.4	Ergebnisse der Bauteilversuche	B-23
Anhang C	Rissfortschrittssimulationen	C-1
Anhang C.1	K-Faktoren entlang der Rissfront.....	C-3
Anhang C.2	Maßgeblicher K-Faktor.....	C-7
Anhang D	Zulässige Restspalte für Stumpfstoßverbindungen ..	D-1
Anhang D.1	Stumpfstoße mit DHY-Schweißnaht unter vorwiegend ruhender Beanspruchung.....	D-3
Anhang D.2	Stumpfstoße mit DHY-Schweißnaht unter nicht ruhender Beanspruchung	D-7
Anhang D.3	Stumpfstoße mit HY-Schweißnaht unter vorwiegend ruhender Beanspruchung.....	D-9
Anhang D.4	Stumpfstoße mit HY-Schweißnaht unter nicht ruhender Beanspruchung	D-13

Anhang E Ultraschalluntersuchungen und Bruchflächenanalyse E-1

Anhang E.1 Restspaltmessung an Kreuzstoßverbindungen E-5
Anhang E.2 Restspaltmessung an Stumpfstoßverbindungen E-11
Anhang E.3 Auswertung der Rissfronten E-19

1 Einleitung

1.1 Anlass und Aufgabenstellung

Schweißverbindungen können Fertigungsfehler, metallurgische Veränderungen des Grundwerkstoffs oder auch innere Ungängen aufweisen. Mögliche Ungängen bei HV- oder DHV-Nähten sind unzulässige Restspalte, wobei mit „Restspalt“ jeweils die Länge der fehlenden Durchschweißung bezeichnet wird, Bild 1-1.

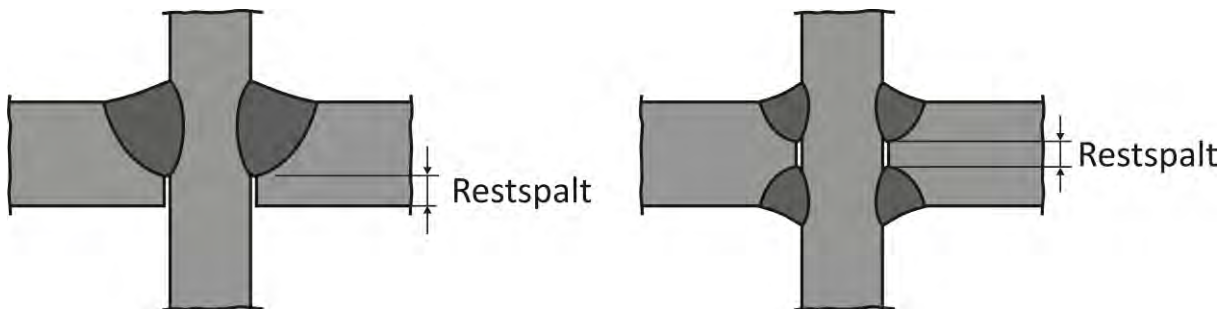


Bild 1-1 HV- bzw. DHV-Schweißstoß mit Restspalt bei Kreuzstößen

Zwar fordert die aktuelle Normung bei nachgewiesener Nahtgüte durch- oder gegengeschweißter Nähte den Nachweis einer Durchschweißung, jedoch wäre es sowohl für statisch als auch für dynamisch beanspruchte Bauteile möglich, Schweißnähte mit gewissen Restspalten zu tolerieren, wenn diese zuverlässig durch eine zerstörungsfreie Prüfung quantifizierbar wären [1]. Eine solche „Fitness-for-Purpose“-Strategie ist an folgende Voraussetzungen geknüpft:

- eine ausreichend genaue quantifizierbare Bestimmung der Restspaltlänge durch ein zerstörungsfreies Prüfverfahren (UT), sowie
- eine exakte Definition der Anforderungen einer Schweißverbindung und der mit den Anforderungen verträglichen Restspaltlängen.

Für die Beurteilung von gefundenen Restspalten in durchgeschweißten Schweißnähten gibt es eine Reihe von Verfahren auf bruchmechanischer Basis, die nach Vorliegen des Prüfbefundes anwendbar sind [2][3][4][5].

Jedoch fehlte bis vor kurzem eine Methode zur Klassifizierung und damit einhergehend zur Tolerierung von Restspaltlängen bereits in der Schweißplanung, so dass Mehraufwand bei der Fertigung von Anfang an vorprogrammiert war.

Mit dem von den Antragstellern jüngst abgeschlossenen AiF-Forschungsprojekt 14174 N „Feststellung und Bewertung zulässiger Restspalte beim Schweißen“ [1] sind Grundlagenuntersuchungen durchgeführt worden, die auf der einen Seite die Festlegung zulässiger Restspalte in Vollanschlüssen sowohl für statisch als auch für dynamisch beanspruchte Schweißdetails ergab, und andererseits hinreichend genaue UT-Prüfmethoden zur zuverlässigen Bestimmung von Restspalten ergab. Die Ergebnisse dieses Projektes, deren Grundlagen in Anlage 4 dargestellt sind, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Unter experimenteller Verifizierung ist gezeigt worden, dass sich die Restspaltlängen für den HV- und DHV-Stoß in T- und Kreuzverbindung bruchmechanisch unter Anwendung des Sprödbruchkriteriums [2][3]

$$K_{appl,d}^* (\text{Belastung, Rissgröße, Geometrie}) \leq K_{mat,d} (\text{Stahlsorte, Temperatur})$$

sehr genau definieren lassen, so dass kein Sicherheitsverlust gegenüber der auf Nachweis voll durchgeschweißten Variante entsteht. Dies gilt sowohl für statisch als auch dynamisch beanspruchte Schweißverbindungen. Die Ergebnisse gelten für typische Blechdicken und Blechdickenkombinationen und sind in Form von Grafiken bzw. Bemessungshilfen [1] aufbereitet, Bild 1-2.

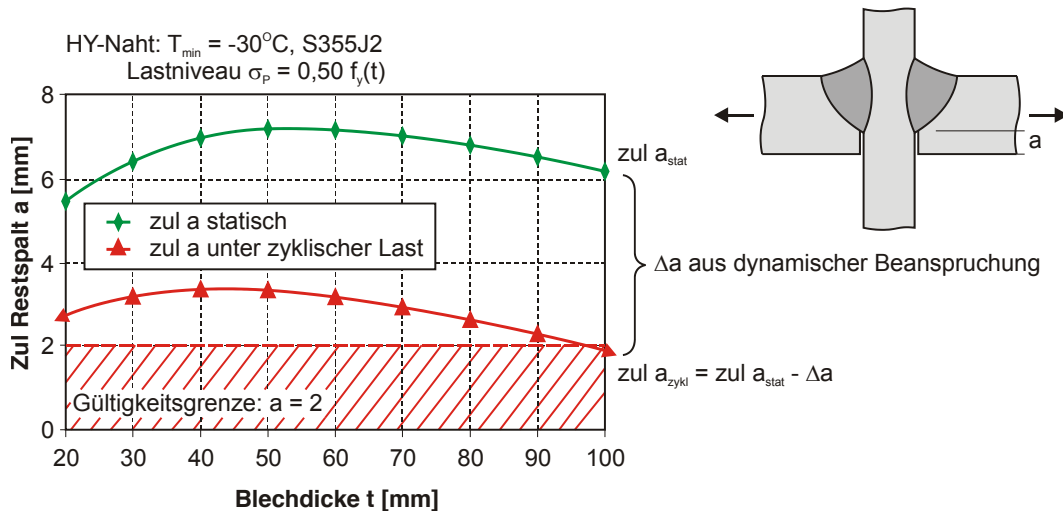


Bild 1-2 Beispiel für zulässige Restspalte, statische und Ermüdungsbeanspruchung [1]

2. Die UT-Prüfmethoden wurden hinsichtlich Detektionssicherheit und Detektionsgenauigkeit weiter verbessert bzw. so kalibriert, dass es nun möglich ist, zahlenmäßig beschreibbare Aussagen über Größe und Form vorhandener Restspalte zu treffen. Dies war bis dahin nicht möglich, vielmehr beschränkte sich die übliche UT-Aussage auf „Durchschweißung erfüllt“ bzw. „nicht erfüllt“.
3. Damit können nun bei ausreichendem Sicherheitsniveau Vollanschlüsse mit definiert verbleibendem Restspalt ausgeführt werden. Der verbleibende Restspalt kann definiert groß und durch ZfP-Verfahren sicher quantifiziert werden.

Hier liegt nun ein erheblicher Technologiegewinn vor, denn bislang konnten entsprechende Schweißanschlüsse nur bei auf Nachweis durchgeschweißter Naht erlaubt werden. Dies ergab sich aus dem Umstand, dass eine geometrische Quantifizierung von Fehlern bzw. Restspalten auf ihre Sicherheitsbewertung bislang fehlte.

4. Gleichwohl geben in Hinblick auf eine Anwendbarmachung und eine Umsetzung in technische Regeln folgende Aspekte die Notwendigkeit für ergänzende Forschungsarbeiten:
5. Die Versuchskörper des zuvor beschriebenen AiF-Projektes [1] sind durchweg aus sehr zähen Grundwerkstoffen hergestellt worden, Bild 1-3. Zudem waren die Schweißungen stets von sehr guter Qualität. Es liegt nahe, die Sicherheitsdargebote der Konstruktionen auch unter ungünstigen Material- und Fertigungsparametern zu prüfen.

6. Aufgrund von Problemen mit der Herstellung von definierten, durch dynamischen Rissfortschritt erzeugten Rissfronten, die für die Verifikation der bruchmechanischen Theorien geeignet sind, ist die Anzahl der Versuchskörper mit DHV-Stoß und innen liegendem Restspalt gegenüber den Versuchsplanungen im Projekt [1] von 4 auf 2 reduziert. Auch hier ist es notwendigerweise geboten, in Hinblick auf eine Übertragung der Ergebnisse in die Normung, die Versuchsdatenbasis zu vergrößern.
7. Über Kreuz- und T-Stöße hinaus fehlt die Übertragung auf Stumpfstöße
8. Die Feststellung vorhandener Risse mit dem verbesserten UT-Verfahren [1] erfolgt zur Zeit mit gewissen Abweichungen, Tabelle 1-1, was zwar eine erhebliche Verbesserung zur Situation vorher darstellt, die Ableitung eines sicheren Vorhaltemaßes fehlt jedoch noch.

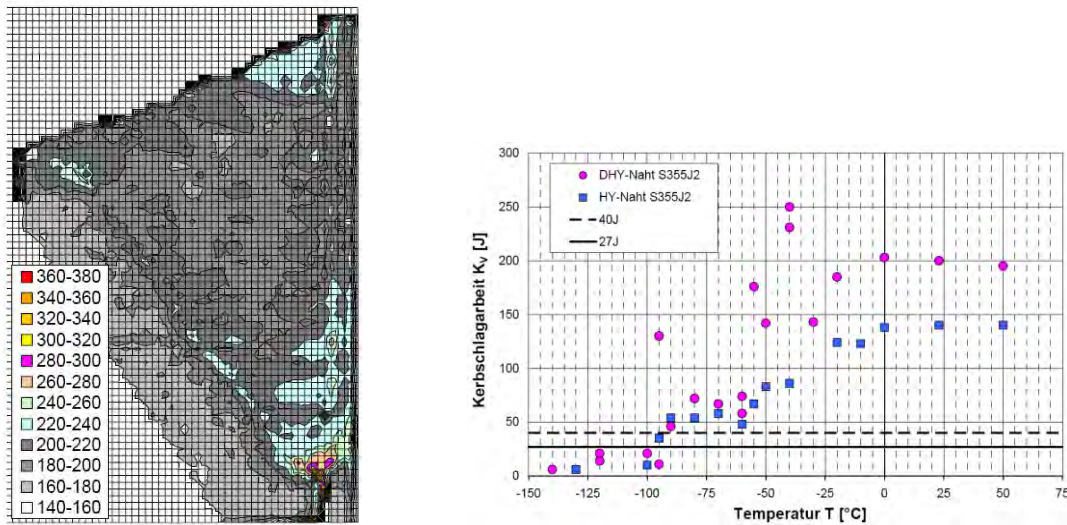


Bild 1-3 Beispiele für Härte und Kerbschlagarbeiten in [1] getester Schweißnähte

Tabelle 1-1 Erreichte Genauigkeiten bei der UT-Prüfung [1]

Nahtform		Abweichung „ist-gemessen“ gemittelt über die Länge
HY-Naht	ohne Luftspalt	1-3 mm
	mit Luftspalt	2-4 mm
DHY-Naht		1-2 mm

Daher ist es geboten, ergänzende Untersuchungen in einem Fortsetzungsprojekt durchzuführen, um die Ergebnisse allgemein zu normen und die begonnene Initiative nebst Fördermitteln nicht verpuffen zu lassen.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Vor dem Hintergrund der Anwendbarmachung und Überführung in technische Regeln bzw. Normenwerke sind folgende Ziele zur Verallgemeinerung der in [1] gefundenen Ergebnisse zu erreichen:

1. Übertragung und Absicherung der Ergebnisse für ungünstigere, aber erwartbare Material- und Fertigungsqualitäten, ggf. Anpassung der Werte.
2. Erweiterung und Schließen von Lücken in der Datenbasis der Verifikationsversuche zwecks Schaffung ausreichender Repräsentanz.
3. Quantifizierung des Vorhaltemaßes von Restspaltgrößen bei Anwendung des in [1] erarbeiteten UT-Verfahrens zur zahlenmäßigen Bestimmung von Restspaltgrößen
4. Konkrete Erarbeitung einer Anwendungsrichtlinie

1.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Als Ergebnis der Untersuchung wird ein Katalog der zulässigen Restspalt- und Ungänzengrößen abhängig von der Schweißnahtausbildung und Schweißnahtbeanspruchung geliefert, die mit den Unschärfen des jeweiligen UT-Prüfverfahrens verträglich sind.

Ausgehend von diesem Katalog wird es in der Zukunft für alle Stahlbauunternehmen möglich sein, das Risiko beim Schweißen von Anschlüssen, die einer dynamischen Beanspruchung ausgesetzt werden sollen, und die möglicherweise beim Schweißen auftretenden kleineren Schweißnahtunregelmäßigkeiten anhand der zulässigen Restspalte genau einzustufen und das damit verbundene Sicherheits- und Kostenrisiko bereits in der Planungsphase abzuschätzen.

Somit wird es in Zukunft auch wieder kleineren und mittelständischen Betrieben möglich sein, Aufträge ohne extremes Vertragsrisiko leichter anzunehmen.

1.2.3 Methodischer Ansatz

Der Lösungsweg gemäß [1] bietet sich auch hier an. Auf Grundlage der Annahme Restspalt = Riss wird ein bruchmechanischer Zähigkeitsnachweis geführt. Zur Anwendung kommt der Sicherheitsnachweis zur Vermeidung von Sprödbbruch, der auch in den Hintergrundmethoden des Eurocode 3, Teil 1-10 [2], sowie der DASt-Richtlinie 009 [3] zur Stahlsortenauswahl eingeflossen ist. Der Nachweis basiert auf den o.g. bruchmechanischen Größen:

1.3 Ergebnis

Die Zielsetzungen im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden vollständig erreicht.

Es wurden alle Arbeitsschritte gemäß Forschungsantrag erbracht. Diese umfassen:

- Vorversuche und Ableitung einer geeigneten $t_{9/5}$ -Zeit zur Einstellung definierter Materialzähigkeiten der Schweißverbindungen,

- Kleinprobenuntersuchungen zur Materialcharakterisierung,
- Durchführung von acht Bauteilversuchen (anstelle von vier gemäß Forschungsantrag),
- grundlegende bruchmechanische Untersuchungen an Bauteilen mit Stumpfstößen und Restspalten sowie Parameterstudie,
- theoretische Ableitung eines Kataloges an zulässigen Restspaltgrößen für Stumpfstoßverbindungen.

Die erzielten Ergebnisse innerhalb des Forschungsprojektes stellen die Grundlage zu einem Bemessungskonzept zur Bewertung ungenügender Schweißverbindungen mit Restspalten dar. Dieses Bemessungskonzept wurde sowohl experimentell als auch theoretisch mit Hilfe der Konzepte der Bruchmechanik verifiziert. Weiterhin steht eine ausgereifte Prüftechnik zur hinreichenden Bestimmung von Restspaltgrößen zur Verfügung, so dass alle Voraussetzungen gegeben sind, die Forschungsergebnisse in einer entsprechenden DAST-Richtlinie zu etablieren.

2 Theoretische Grundlagen

Die Ableitung zulässiger Restspalte basiert auf einem bruchmechanischen Konzept zur Vermeidung von Sprödbruch. Detaillierte Hintergrundinformationen sowohl zur Bruchmechanik als auch zum Nachweiskonzept zur Vermeidung von Sprödbruch können dem Abschlussbericht zum Vorgängerprojekt AiF 14174 N [1] entnommen werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Informationen dazu knapp zusammengefasst.

Weiterhin wird die aktuelle Normensituation hinsichtlich der Anforderung an geschweißte Vollstöße und deren Beurteilung dargestellt.

Im Zuge der Arbeiten des Forschungsprojektes war es notwendig, Schweißverbindungen mit definierten Zähigkeitseigenschaften herzustellen. Der die Zähigkeitseigenschaften einer Schweißnaht maßgeblich kontrollierende Parameter ist die sogenannte $t_{8/5}$ -Zeit. Deren rechnerische als auch experimentelle Bestimmung wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

2.1 Aktuelle Normensituation

Die Beurteilung von Unregelmäßigkeiten in Schweißverbindungen erfolgt im Stahlbau unter Anwendung der DIN EN ISO 5817 „Schmelzschweißverbindungen an Stahl; Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten“ [6]. Diese Norm gibt drei verschiedene Bewertungsgruppen zur Beurteilung von Unregelmäßigkeiten in Schweißverbindungen vor, welche Qualitätsanforderungen an die Naht festlegen, vgl. Tabelle 2-1. Schweißnähte mit Unregelmäßigkeiten können somit einer zugehörigen Bewertungsgruppe zugeordnet werden.

Tabelle 2-1 Bewertungsgruppen nach EN ISO 5817:2006 [6]

Bewertungsgruppe nach EN ISO 5817:2006	Anforderungen an die Schweißnaht
D	niedrig
C	mittel
B	hoch

Gemäß DIN EN ISO 5817 sind nicht planmäßig vorgesehene Restspalte als Unregelmäßigkeit, in das Merkmal 2.13 „Ungenügende Durchschweißung“ einzuordnen. Eine solche „Ungenügende Durchschweißung“ ist nur für niedrige Anforderungen an die Schweißnaht (Bewertungsgruppe D) ausschließlich in bestimmten Grenzen zulässig. Für Bauteile mit mittleren sowie hohen Anforderungen an die Schweißnaht (Bewertungsgruppen C und B) sind nicht planmäßig vorhandene Restspalte nicht zulässig, vgl. Bild 2-1.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Schweißverbindungen auf nationaler sowie europäischer Ebene beschrieben.

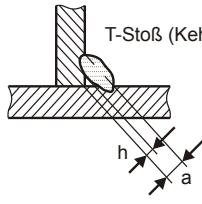
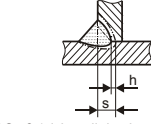
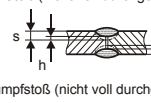

Nr.	Ordnungs-Nr. nach ISO 6520-1	Unregelmäßigkeit Benennung	Bemerkungen	t [mm]	Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten bei Bewertungsgruppen		
					D	C	B
2.13	402	Ungenügende Durchschweißung	 T-Stoß (Kehlnaht)	> 0,5	Kurze Unregelmäßigkeit - $h \leq 0,2a$, aber max. 2 mm	nicht zulässig	nicht zulässig
			 T-Stoß (nicht voll durchgeschweisst)	$\geq 0,5$	Kurze Unregelmäßigkeit - Stumpfnah: $h \leq 0,2s$, aber max. 2 mm - T-Stoß: $h \leq 0,2a$, aber max. 2 mm	Kurze Unregelmäßigkeit - Stumpfnah: $h \leq 0,1s$, aber max. 1,5mm - Kehlnaht: $h \leq 0,1a$, aber max. 1,5 mm	nicht zulässig
			 Stumpfstoß (nicht voll durchgeschweisst)				
 Stumpfstoß (durchgeschweisst)	$\geq 0,5$	Kurze Unregelmäßigkeit - $h \leq 0,2t$, aber max. 2 mm	nicht zulässig	nicht zulässig			

Bild 2-1 Auszug aus der Tabelle 1 in DIN EN ISO 5817 [6]

2.1.1 Europäische Normenlage (EN 1090-2:2008-12)

Zur Beurteilung der Anforderungen an die Schweißnaht werden gemäß EN 1090-2:2008-12 [7] vier Ausführungsklassen EXC (Execution classes) unterschieden, wobei die Anforderungen von EXC1 bis EXC4 ansteigen.

Unter Bezugnahme auf DIN EN ISO 5817 werden die Abnahmekriterien von Schweißverbindungen nach EN 1090-2:2008-12 mit Ausnahme der Merkmale „Schroffer Nahtübergang“ (505) und „Mikro-Bindefehler“ (401) wie folgt vorgeschrieben:

- EXC1: Bewertungsgruppe D;
- EXC2: Im Allgemeinen Bewertungsgruppe C mit Ausnahme von Bewertungsgruppe D für „Einbrandkerbe“ (5011, 5012), „Schweißgutüberlauf“ (506), „Zündstelle“ (601) und „Offener Endkraterlunker“ (2025);
- EXC3 Bewertungsgruppe B;
- EXC4 Bewertungsgruppe B+, die sich aus Bewertungsgruppe B und den in Tabelle 17 angegebenen Zusatzanforderungen zusammensetzt.

Die Ausführungsklassen werden in Abhängigkeit der Schadensfolgeklassen (CC1 bis CC3), der Beanspruchungskategorien (SC1, SC2) sowie der Herstellungskategorien (PC1, PC2) bestimmt, vgl. Bild 2-2 bis Bild 2-5.

Schadensfolgeklassen		CC1		CC2		CC3	
Beanspruchungskategorien		SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2
Herstellungskategorien	PC1	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 ^a	EXC3 ^a
	PC2	EXC2	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 ^a	EXC4

^a EXC4 sollte bei außergewöhnlichen Tragwerken oder bei Tragwerken mit hohen Versagensfolgen angewendet werden, entsprechend der nationalen Vorschriften

Bild 2-2 Empfohlene Matrix zur Bestimmung der Ausführungsklassen gemäß EN 1990 [8]

Schadensfolgeklassen	Merkmale	Beispiele im Hochbau oder bei sonstigen Ingenieurbauwerken
CC 3	Hohe Folgen für Menschenleben <u>oder</u> sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beeinträchtigende wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. ein Bürogebäude)
CC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben <u>und</u> kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)

Bild 2-3 Schadensfolgeklassen gemäß EN 1090-2:2008-12 [7]

Kategorien	Merkmale
SC1	<ul style="list-style-type: none"> Tragwerke und Bauteile, bemessen nur für vorwiegend ruhende Belastungen (Beispiel: Gebäude) Tragwerke und Bauteile mit deren Verbindungen, bemessen für Erdbebeneinwirkungen in Regionen mit geringer Seismizität und in DCL* Tragwerke und Bauteile, bemessen für Ermüdungseinwirkungen von Kranen (Klasse S₀)**
SC2	<ul style="list-style-type: none"> Tragwerke und Bauteile, bemessen für Ermüdungsbelastungen nach EN 1993. (Beispiele: Straßen- und Eisenbahnbrücken, Krane (Klasse S₁ bis S₉)**, Schwingungsempfindliche Tragwerke bei Einwirkung von Wind, Fußgängern oder rotierenden Maschinen) Tragwerke und Bauteile mit deren Verbindungen, bemessen für Erdbebeneinwirkungen in Regionen mit mittlerer oder starker Seismizität und in DCM* und DCH*

* DCL, DCM, DCH: Duktilitätsklassen nach EN 1998-1

** Zur Klassifizierung von Ermüdungseinwirkungen von Kranen siehe EN 1991-3 und EN 13001-1

Bild 2-4 Beanspruchungskategorien gemäß EN 1090-2:2008-12 [7]

Kategorien	Merkmale
PC1	<ul style="list-style-type: none"> Nicht geschweißte Bauteile, hergestellt aus Stahlprodukten aller Stahlsorten Geschweißte Bauteile, hergestellt aus Stahlprodukten der Stahlsorten unter S355
PC2	<ul style="list-style-type: none"> Geschweißte Bauteile, hergestellt aus Stahlprodukten der Stahlsorten S355 und darüber Für die Standsicherheit wesentliche Bauteile, die auf der Baustelle miteinander verschweißt werden Bauteile, die durch Warmumformen gefertigt oder im Verlauf der Herstellung einer Wärmebehandlung unterzogen werden Bauteile aus Kreishohlprofil-Fachwerkträgern, die besonders geschnittene Endquerschnitte erfordern

Bild 2-5 Herstellungskategorien gemäß EN 1090-2:2008-12 [7]

2.1.2 Nationale Normenlage (DIN 18800-7:2008-11)

Für die Ausführung gemäß DIN 18800-7:2008-11 „Stahlbauten; Teil 7: Ausführung und Herstellerqualifikation“ [9] werden die einzuhaltenden Bewertungsgruppen folgendermaßen beschrieben:

- (1204) Sofern in den Zeichnungen keine anderen Vorgaben für die zulässigen Unregelmäßigkeiten enthalten sind, sind bei Bauteilen mit vorwiegend ruhender Beanspruchung bei Verwendung von Schmelzschweißprozessen die zulässigen Grenzwerte für die Unregelmäßigkeiten der Bewertungsgruppe C nach DIN EN ISO 5817 einzuhalten. [...]

Die Merkmale 1.6 „Ungenügender Wurzeleinbrand“ und 2.13 „Ungenügende Durchschweißung“ sind anzuwenden, wenn in der Zeichnung nicht planmäßig eine ungenügende Durchschweißung zulässig ist.

- (1205) Bei Bauteilen mit nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung sind bei Verwendung von Schmelzschweißprozessen die zulässigen Grenzwerte der Bewertungsgruppe B nach DIN EN ISO 5817 einzuhalten.

2.1.3 Schlussfolgerungen

Demzufolge wird für Stahlbauten, die nach DIN 18800-7:2008-11 bzw. nach DIN EN 1090-2:2008-12 gefertigt werden, für statisch beanspruchte Bauteile die Bewertungsgruppe C und für ermüdungsbeanspruchte Bauteile die Bewertungsgruppe B für das Merkmal Nr. 2.13 der EN ISO 5817 gefordert. Für beide Gruppen sind unplanmäßig ungenügende Durchschweißungen mit Ausnahme von kurzen Unregelmäßigkeiten bei Kehlnähten unter bestimmten Voraussetzungen nicht zulässig, vgl. Bild 2-1.

2.1.4 Nicht vorwiegend ruhend beanspruchte Schweißverbindungen

Im Falle einer planmäßig nicht durchgeschweißten Schweißnaht unter statischer Beanspruchung sind in Tabelle 19 der DIN 18800-1 [10] die rechnerischen Schweißnahtdicken

- für durch- oder gegengeschweißte Nähte (Stumpfnähte und HV-Nähte),
- für nicht durchgeschweißte Nähte (HY-Nähte) sowie

- für Kehlnähte

zu finden, mit denen die Tragfähigkeit der Schweißverbindung beurteilt werden kann. Sofern die Nahtdicken aus der Norm eingehalten werden, sind planmäßig nicht durchgeschweißte Nähte zugelassen.

Bei dynamischer Beanspruchung gelten diese Anforderungen jedoch nicht. Hier könnte der Restspalt an der geometrischen Kerbe als Anriss wirken und durch die zyklische Belastung weiter anwachsen, bis es zum Versagen kommt. Für diesen Fall gibt es verschiedene Methoden zur Bewertung der Tragsicherheit unter Ermüdungsbelastung, u.a. Ermüdungskonzepte (Nennspannungskonzept, Strukturspannungskonzept, Kerbspannungskonzept bzw. Kerbgrundkonzept) sowie bruchmechanische Methoden wie das Rissfortschrittskonzept.

2.2 Bruchmechanische Grundlagen

Weisen Strukturen Ungängen in Form von scharfen Anrissen auf, gelangt die klassische Festigkeitslehre an ihre Grenzen. Abhilfe können hierbei beispielsweise bruchmechanische Ansätze schaffen, die eine lokale Beschreibung des Spannungsfeldes in unmittelbarer Rissnähe zulassen.

Risse in einem Bauteil führen an diesen Unstetigkeiten zu starken Spannungsspitzen. Diese Rissspitzenspannungen würden nach den klassischen Methoden der Mechanik unendlich groß werden, was nicht der Realität entspräche. Vielmehr kommt es zu einem Abbau der Spannungen durch Plastizierungen an der Rissspitze. Je nachdem wie groß diese plastischen Verformungen sind, können Konzepte der elastisch-plastischen Bruchmechanik (EPBM) oder die linear-elastische Bruchmechanik (LEBM) angewandt werden.

2.2.1 Linear-Elastische Bruchmechanik (K-Konzept)

Bleiben die plastischen Verformungen an der Rissspitze im Verhältnis zum Ligament sehr klein, können die Methoden der linear-elastischen Bruchmechanik angewendet werden.

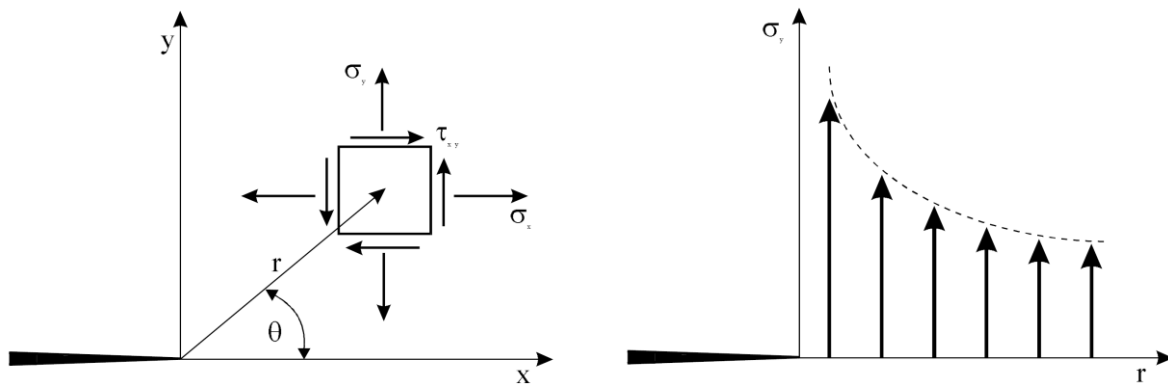
Der Spannungsintensitätsfaktor SIF oder auch K-Faktor beschreibt in der linear-elastischen Bruchmechanik die Stärke des Spannungsanstieges bei Annäherung an die Rissspitze ($r \rightarrow 0$) und stellt die bruchmechanische Kenngröße dar. Der K-Wert lässt sich aus dem Spannungsfeld um die Rissspitze gemäß Gl. (2-1) ableiten.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cdot \cos \frac{\vartheta}{2} \left[1 - \left(\sin \frac{\vartheta}{2} \cdot \sin \frac{3\vartheta}{2} \right) \right] = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_x(\vartheta) / F \\ \sigma_y &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cdot \cos \frac{\vartheta}{2} \left[1 + \left(\sin \frac{\vartheta}{2} \cdot \sin \frac{3\vartheta}{2} \right) \right] = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_y(\vartheta) / F \\ \sigma_{xy} &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cdot \cos \frac{\vartheta}{2} \cdot \sin \frac{\vartheta}{2} \cdot \cos \frac{3\vartheta}{2} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_{xy}(\vartheta) / F\end{aligned}\tag{2-1}$$

mit

- a: Risslänge [mm]
 σ : Spannung aus äußerer Last [N/mm²]
 r, θ : Polarkoordinaten
 f_x, f_y, f_z : Dimensionslose Funktionen in Abhängigkeit vom Polarwinkel
 K: Spannungsintensitätsfaktor [N/mm^{3/2} bzw. MPa·m^{1/2}]

Das vor der Rissspitze vorherrschende Spannungsfeld wird unter der Annahme isotropen, linear-elastischen Materialverhaltens nach Westergaard [12] durch Spannungsfunktionen an einem infinitesimalen Element beschrieben, dessen Lage durch die Polarkoordinaten r und θ gegeben ist, Bild 2-6.



Rissspitze

Elastische Spannungen vor der Rissspitze

Bild 2-6 Spannungskomponenten vor der Rissspitze

Standardmäßig wird der K-Faktor als eine von der Rissgröße, der Spannung sowie der Geometrie abhängige Funktion dargestellt:

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (2-2)$$

mit

- F: Dimensionslose Korrekturfunktion zur Erfassung der Riss und Bauteilgeometrie: $F = M_k \cdot Y$ [-]
 M_k : Funktion zur Erfassung der Bauteilgeometrie [-]
 Y: Funktion zur Erfassung der Rissgeometrie [-]

Für die beiden Funktionen M_k und Y existieren für zahlreiche einfache Geometrien bereits umfangreiche Kataloge an Handrechenformeln, die analytisch oder numerisch hergeleitet worden sind. Beim idealisierten Fall einer unendlich großen Rechteckplatte mit einem zentralen Riss der Größe 2a gilt $Y = M_k = 1$, vgl. Bild 2-7.



Bild 2-7 Unendlich große Rechteckplatte

Bei Vorliegen komplexerer Bauteil- und Rissgeometrien, für die es keine Formeln für die Spannungsintensitätsfaktoren gibt, greift man zu numerischen Berechnungsmethoden. Häufig sind dies Finite-Elemente (FE)-Methoden aber auch Boundary-Element (BE)-Methoden, vgl. Abschnitt 4.1.

Bei der Rissbetrachtung werden drei verschiedene Rissöffnungen, bedingt durch unterschiedliche Beanspruchungsarten, unterschieden. Diese Rissöffnungsarten werden Moden genannt, vgl. Bild 2-8:

Mit den drei Moden sind jeweils die Spannungsintensitätsfaktoren K_I (Modus I), K_{II} (Modus II) und K_{III} (Modus III) verknüpft. Bei kombinierter „Mixed – Mode“ – Beanspruchung, kann ein effektiver Spannungsintensitätsfaktor K_{eff} ermittelt werden, vgl. Gl (2-3). Für den Belastungsfall Zug orthogonal zur Rissfläche wird ein Riss maßgeblich im Modus I (Normalspannungsmodus) beansprucht.

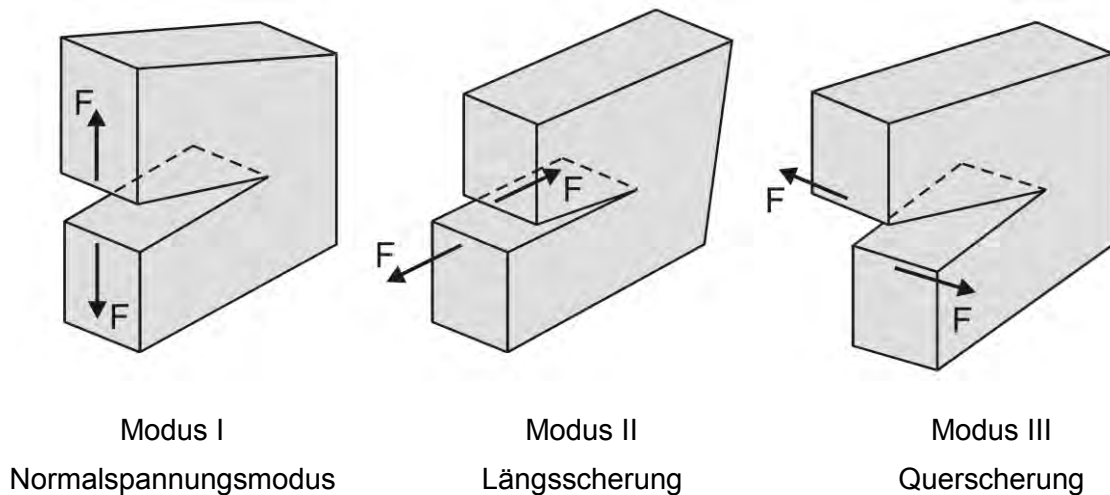


Bild 2-8 Rissbeanspruchungsarten

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_I \cdot f_{ij}^I(\vartheta) + K_{II} \cdot f_{ij}^{II}(\vartheta) + K_{III} \cdot f_{ij}^{III}(\vartheta) \right] \quad (2-3)$$

K_{Ic} ist der kritische Spannungsintensitätsfaktor, bei dessen Überschreitung mit Bruchversagen zu rechnen ist ($K_I \leq K_{Ic}$). Dieser wird auch Bruch- oder Risszähigkeit genannt und hängt von den Werkstoffeigenschaften ab.

2.2.2 Elastisch-plastische Bruchmechanik

Bei großen plastischen Verformungen gegenüber den Bauteilabmessungen (vor Eintreten des Bruchversagens) sowie bei nichtlinear-elastischen Materialien, z.B. Kunststoffen, ist die LEBM nicht mehr anwendbar. Es muss dann auf die elastisch-plastische Bruchmechanik EPBM zurückgegriffen werden. Dabei kann das J-Integral-Konzept nach Rice [13] und das CTOD-Konzept nach Wells [14] verwendet werden. Beide Methoden sind auch für linear-elastisches Verhalten gültig.

Die J-Integral-Methode charakterisiert im zweidimensionalen Fall als wegunabhängiges Linienintegral um die Risspitze das Spannungs-Dehnungsfeld und berücksichtigt plastische Verformungen im Bereich der Risspitze, vgl. Gl. (2-4), Bild 2-9. Dabei tritt bei Überschreiten des kritischen J-Integrals, der Materialzähigkeit J_{Ic} , Bruchversagen ein.

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T \frac{\delta u}{\delta x} ds \right) \quad (2-4)$$

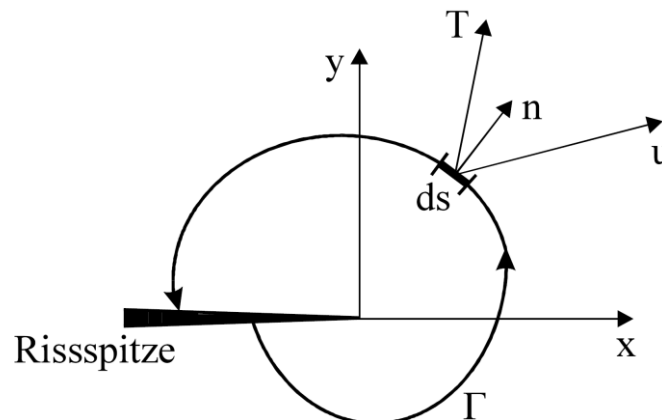


Bild 2-9 Definition J-Integral

Das CTOD (δ) –Konzept (Crack Tip Opening Displacement) berücksichtigt die Verschiebung der Rissflanken im Bereich der Risspitze. Das Versagenskriterium ist die plastische Rissöffnung δ , vgl. Bild 2-10.

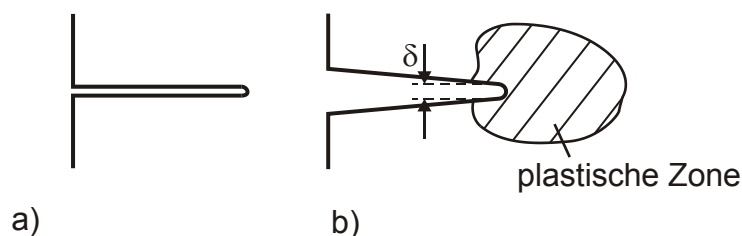


Bild 2-10 Rissaufweitung δ , a) unbelasteter Riss, b) belasteter Riss

2.2.3 Rissfortschritt

In Bauteilen unter nicht ruhender Beanspruchung kann ein Riss an der Stelle der höchsten Spannungskonzentration infolge Ermüdung weiter wachsen (Risswachstum). Zur Bewertung

des Rissfortschrittsverhaltens stehen Rissfortschrittsgesetze zur Verfügung, die den Spannungsintensitätsfaktor an der Risspitze in Beziehung zur Rissfortschrittsgeschwindigkeit setzen, mit der ein Riss infolge von zeitvariablen Lastspielen wächst. Die Rissfortschrittsgeschwindigkeit bzw. Rissfortschrittsrate da/dN wird als logarithmische Funktion von ΔK graphisch dargestellt, vgl. Bild 2-11.

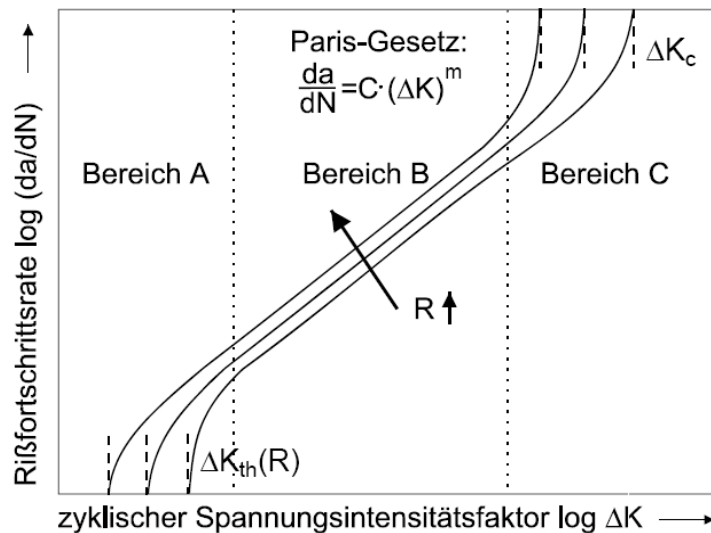


Bild 2-11 Rissfortschrittskurve

Es werden drei Bereiche unterschieden:

- Bereich A:** Bereich ist durch einen unteren Schwellenwert ΔK_{th} (Thresholdwert) definiert. Liegt die Kurve unterhalb dieses Schwellenwertes, ist kein Risswachstum zu erwarten. ΔK_{th} ist vom Werkstoff und dem Spannungsverhältnis R abhängig.
- Bereich B:** Die Funktion verläuft in diesem Bereich nahezu linear. Dieser Bereich wird durch die Paris-Gleichung [15], vgl. Gl. (2-5), beschrieben. Man spricht hierbei von stabilem Risswachstum. Das Spannungsverhältnis R hat in diesem Bereich keinerlei Einfluss.
- Bereich C:** Die Risswachstumsgeschwindigkeit steigt in diesem Bereich sehr schnell an bis hin zu instabilen Risswachstum. Als oberer Grenzwert ist ΔK_c (Risszähigkeit des Materials) definiert, bei dessen Überschreitung Bruchversagen eintritt.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (2-5)$$

mit

a: Risslänge

N: Anzahl der Lastspiele

da/dN : Risswachstumsgeschwindigkeit; Rissausdehnung da pro Lastspiel
 dN

- ΔK : zyklischer Spannungsintensitätsfaktor, Differenz von K_{\max} und K_{\min} hervorgerufen durch die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$
- C,m: voneinander abhängige Werkstoffparameter, die im Rissfortschrittsversuch ermittelt werden, wobei m Werte zwischen 2 und 4 annimmt (meistens 3); Im Rahmen dieser Untersuchung wurden für C folgende Werte gewählt:
- | | |
|---------------------------|------------|
| $C = 1,80 \cdot 10^{-13}$ | gemäß [16] |
| $C = 2,20 \cdot 10^{-13}$ | gemäß [17] |
| $C = 5,21 \cdot 10^{-13}$ | gemäß [18] |

2.3 Nachweiskonzept zur Vermeidung von Sprödbruch

Das zuvor beschriebene K-Konzept liefert die Eingangswerte zur Führung des Sicherheitsnachweises zur Vermeidung von Sprödbruch dar. Dieser wurde für eine den Brückenbau betreffende spezifische Bemessungssituation entwickelt und in der DAST-Richtlinie 009 [3] bzw. dem Eurocode 3, Teil 1-10 [2] normativ verankert.

Der Nachweis zur Vermeidung von Sprödbruch legt eine außergewöhnliche Bemessungssituation mit folgenden Randbedingungen zugrunde, vgl. Bild 2-12:

- Alle Anforderungen basieren auf einem Nachweis in der Tieflage (K1c-Bereich).
- An einem Bauteil befindet sich ein Riss an einer kritischen Stelle, der eine kritische Größe erreicht hat. Der Riss wird hypothetisch unterstellt als nicht detektierter Herstellungsfehler, der durch eine Ermüdungsbelastung gewachsen ist.
- Die Temperatur des Bauteils hat einen Minimalwert T_{\min} erreicht, an dem auch die Anforderung an die Materialzähigkeit ihren kleinsten möglichen Wert J_C (Punkt A1 in Bild 2-12) erreicht hat. Dabei kann die Temperatur zähigkeitsreduzierende Einflüsse durch fiktive Temperaturverschiebungen beinhalten wie zum Beispiel der Einfluss der Kaltverformung oder von Anpralllasten.
- Veränderliche Lasten Q und die Temperatur des Bauteils sind unabhängig voneinander (z. B. klimabedingte Temperaturen). Daraus resultiert eine außergewöhnliche Lastkombination, in der $T_{\min,d}$ die Haupteinwirkungsgröße darstellt, die mit den Spannungen aus den Begleiteinwirkungen $G_K + \psi_1 Q_K$ verknüpft ist (Punkt A2 in Bild 2-12).
- Aufgrund der außergewöhnlichen Lastkombination sind die auftretenden Spannungen $\sigma_{Ed} = \sigma (G_K + \psi_1 Q_K)$ elastisch, (Punkt A3 in Bild 2-12).

Die Sprödbruchgefahr wird maßgeblich durch niedrige Bauteiltemperaturen, große blechdicken, hohe Beanspruchungen sowie durch ungünstige Bauteilgeometrien begünstigt.

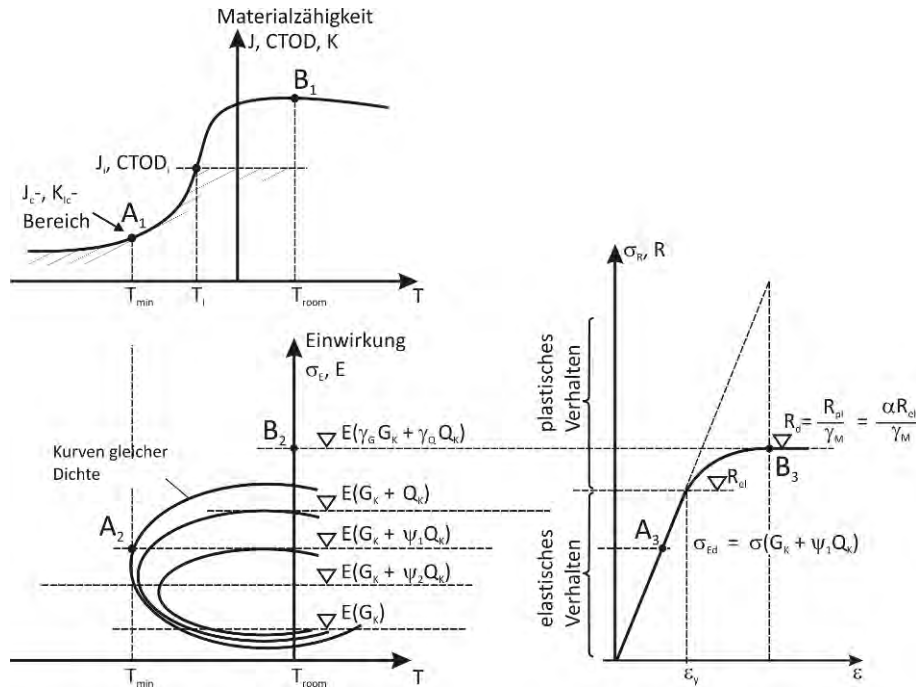


Bild 2-12 Bemessungssituation für die Stahlsortenwahl in DIN EN 1993-1-10

DIN EN 1993-1-10 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung“ bzw. DAST-Richtlinie 009 „Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten“ stellen diesbezüglich standardisierte Tabellen zur Verfügung, mit denen die zulässigen Erzeugnisdicken sowie die erforderlichen Stahlgüten in Abhängigkeit der Einsatztemperatur bestimmt werden können.

Der Sprödbuchnachweis lautet allgemein:

$$E_d \leq R_d \tag{2-6}$$

bzw. mit bruchmechanischen Kennwerten:

$$K_{appl,d}^* \leq K_{Mat,d} \tag{2-7}$$

mit

$$K_{appl,d}^* = \frac{K_{appl,d}}{k_{R6} - \rho} \tag{2-8}$$

und

$K_{appl,d}^*$: Bemessungswert des einwirkenden Spannungsintensitätsfaktors (Erweiterung des linear-elastischen Bruchkriteriums durch das „Failure-Assessment“-Diagramm zur Berücksichtigung lokaler Plastizierung, vgl. Bild 2-13).

$K_{mat,d}$: Bemessungswert der Bruchzähigkeit des Materials

$K_{appl,d}$: Spannungsintensitätsfaktor

k_{R6} : Korrekturfunktion; berücksichtigt Plastizität gemäß des vereinfachten Failure Assessment Diagramms, vgl. Bild 2-13.

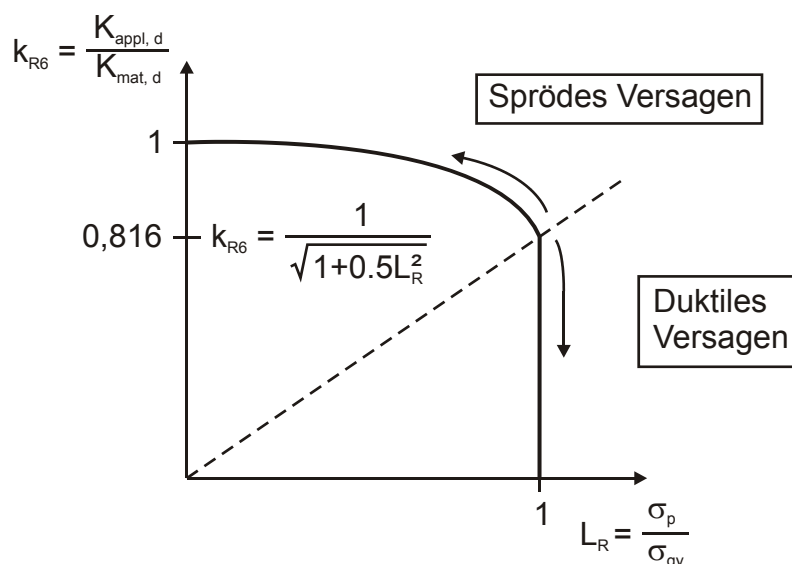


Bild 2-13 Vereinfachtes Failure Assessment Diagramm (FAD)

- L_R : Verhältnis der Nennspannungen aus äußeren Lasten und der Grenzfließspannung σ_{gy}
- σ_{gy} : Spannung, die zum Erreichen der Streckgrenze des Restquerschnitts führt
- ρ : Korrekturfunktion; berücksichtigt die Wechselwirkung zwischen Spannungen aus äußeren Lasten und lokalen Schweißspannungen

In den Liefnormen DIN EN 10025 „Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen: Allgemeine technische Lieferbedingungen und Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle“ [20] werden Mindestzähigkeiten jedoch in Form von Übergangstemperaturen angegeben, die in genormten Kerbschlagbiegeversuchen bestimmt werden. Dies erfordert deshalb eine Transformation der bruchmechanischen Werte in eine Temperaturgleichung. Diese Umformung erfolgt mit Hilfe der Master-Kurve nach Wallin. Die Kerbschlagbiegeversuchswerte werden in Form von Prüftemperaturen (T_{27J} und T_{40J}) angegeben, dessen Indizes (27J oder 40 J) die Mindestkerbschlagarbeit angeben.

Nach Überführung der bruchmechanischen Kenngrößen in temperaturbasierte Kenngrößen lautet das neue Nachweisformat:

$$T_{Ed} \geq T_{Rd} \quad (2-9)$$

mit

T_{Ed} : Einwirkende Temperatur

T_{Rd} : Materials Tiefste ertragbare Temperatur

Die Transformation wird in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wird der von der Referenztemperatur T_{Ed} abhängige Bauteilwiderstand $K_{Mat,d}(T_{Ed})$ durch die standardisierte

Master-Kurve nach Wallin ausgedrückt, vgl. Gl. (2-10). Diese Master-Kurve zeigt, für welche Temperatur T_{100} der K-Wert den Wert $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ annimmt.

$$K_{mat,d}(T_{Ed}) = 20 + \left[70 \left(\exp \frac{T_{Ed} - T_{100} + \Delta T_R}{52} \right) + 10 \right] \left(\frac{25}{b_{eff}} \right)^{1/4} \quad (2-10)$$

mit

T_{100} : Temperatur, bei der die Bruchzähigkeit K_{Mat} den Wert $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ annimmt.

b_{eff} : Länge der Rissfront

ΔT_R : Additives Sicherheitselement. Notwendiger Sicherheitsabstand der Nachweisgleichung gegen sprödes Versagen. ΔT_R wird durch Kalibrierung an Versuchen bestimmt.

Im zweiten Schritt wird die Zähigkeits-Master-Kurve mittels der modifizierten Korrelation nach Sanz [21] mit der Kerbschlagarbeitskurve KV- T_{Ed} korreliert, vgl. Gl. (2-11), indem T_{100} durch die Temperatur T_{27J} ausgedrückt wird:

$$T_{100} = T_{27J} - 18^\circ\text{C} \quad (2-11)$$

Durch Logarithmieren der Gleichung für K erhält man schließlich die temperaturabhängige Nachweisgleichung, s. (2-9).

Die Bezugstemperatur T_{Ed} an der potentiellen Rissstelle ermittelt sich nach Gl. (2-12) somit zu:

$$T_{Ed} = T_{min} + \Delta T_r + \Delta T_\sigma + \Delta T_R + \Delta T_\varepsilon + \Delta T_{ecf} \quad (2-12)$$

mit

T_{min} : Niedrigste Lufttemperatur mit spezifischer Wiederkehrperiode

ΔT_r : Temperaturverschiebung infolge von Strahlungsverlusten $\Delta T_r \sim -5 \text{ K}$

ΔT_σ : Temperaturverschiebung infolge der Spannungen und der Streckgrenze des Werkstoffs, der angenommenen rissähnlichen Imperfektionen, der Bauteilform und der Abmessungen:

$$\Delta T_\sigma = -52 \cdot \ln \left[\frac{\left(K_{appl,d}^* - 20 \right) \cdot \left(\frac{b_{eff}}{25} \right)^{1/4} - 10}{70} \right] \leq 120\text{K} \quad (2-13)$$

ΔT_R : Sicherheitselement in Form einer Temperaturverschiebung

ΔT_{ecf} : Temperaturverschiebung infolge des Kaltverformungsgrades ε_{cf}

ΔT_ε : Temperaturverschiebung zur Berücksichtigung hoher Dehnraten

Auf der Widerstandsseite wird der Temperaturkennwert T_{Rd} als durch die Kerbschlagarbeit ausgedrückte Materialzähigkeit berechnet :

$$T_{Rd} = (T_{27J} - 18) + \Delta T_{27J} \quad (2-14)$$

mit

T_{27J} : Testtemperatur der Kerbschlagzähigkeit, bei der eine Kerbschlagarbeit von 27 J erreicht wird.

ΔT_{27J} : Inhomogenität der Zähigkeit über die Blechdicke. Bei größeren Blechdicken ($t > 20$ mm) wird im Kernbereich (mittleres Drittel: $t/3$) eine um ΔT_{27J} geringere Zähigkeit angenommen. Dies bedeutet, dass im Kernbereich geringere Kerbschlagarbeitswerte zu erwarten sind als in randnahen Bereichen.

$$\Delta T_{27J} = 12,9 \cdot \tanh[2,1 \cdot \ln(t) - 7,5] + 12,8 \quad (2-15)$$

2.4 Bestimmung von $t_{8/5}$ -Zeiten

Von entscheidender Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften einer Schweißverbindung ist der Temperatur-Zeit-Verlauf beim Schweißen. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften einer Schweißverbindung, insbesondere die Zähigkeit, werden u.a. durch die sogenannte $t_{8/5}$ -Zeit bestimmt. Durch Veränderung dieser Abkühlzeit kann eine Mikrostruktur im Werkstoff eingestellt werden, die im Bereich der Schweißnaht z.B. weniger zäh und gleichzeitig härter ist. Die $t_{8/5}$ -Zeit wird dabei als die Zeit definiert, bei der eine Schweißraupe von 800°C auf 500°C abkühlt, Bild 2-14. Dieses Zeitintervall wurde gewählt, da in diesem Bereich die wichtigsten Gefügeumwandlungen ablaufen.

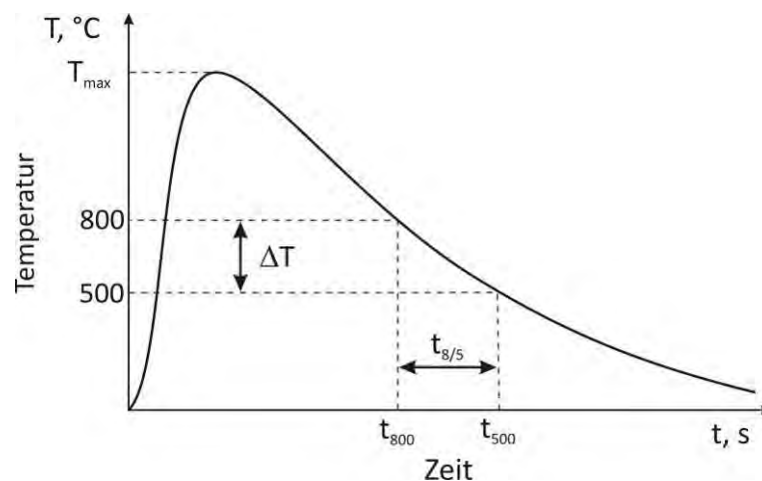


Bild 2-14 Definition der Abkühlzeit $t_{8/5}$ [23]

Nimmt die Abkühlzeit $t_{8/5}$ zu, so fallen die Härtewerte in der Wärmeeinflusszone ab, vgl. Bild 2-15, links. Ggf. dürfen für einige Stähle maximal zulässige Härtewerte nicht überschritten werden, so dass die Schweißparameter so gewählt werden müssen, so dass ein bestimmter Wert der Abkühlzeit nicht unterschritten werden darf.

Zunehmende Werte der $t_{8/5}$ -Zeit bewirken andererseits eine Verringerung der Zähigkeitswerte, was sich durch Verringerung der erzielten Kerbschlagarbeiten in der Wärmeeinflusszone bemerkbar macht, vgl. Bild 2-15, rechts. Gleichzeitig nimmt die Übergangstemperatur in der WEZ zu. Eine zu große Abkühlzeit muss unter Umständen ausgeschlossen werden, wenn für einen Stahl ein vorgegebener Mindestwert der Kerbschlagarbeit nicht unterschritten werden darf.

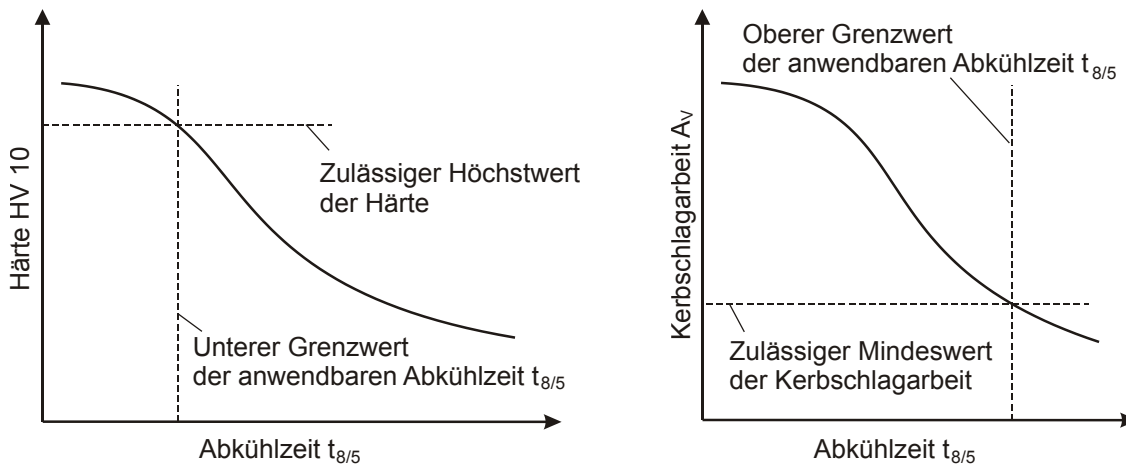


Bild 2-15 Einfluss der $t_{8/5}$ -Zeiten auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften einer Schweißnaht [22]

Im Einzelfall ist die anzuwendende Abkühlzeit nach den jeweilig geforderten mechanischen Eigenschaften sowie deren Auswirkung auf die Festigkeitskennwerte der jeweiligen Schweißverbindung zu bestimmen. Dies kann entweder theoretisch oder im Experiment bestimmt werden. Maßgeblich wird die $t_{8/5}$ -Zeit durch folgende Parameter beeinflusst:

- Bauteildicke
- Nahtform
- Streckenenergie
- Vorwärmtemperatur
- Lagenaufbau

2.4.1 Rechnerische Herleitung der $t_{8/5}$ -Zeit

Unter Berücksichtigung bekannter Schweißrandbedingungen kann die $t_{8/5}$ -Zeit mit Hilfe empirischer Formeln rechnerisch angenähert werden. Dies ist ein für die Praxis wichtiges Hilfsmittel, um so in den kritischen Bereichen der Schweißnaht eine Vorhersage der mechanischen Eigenschaften zu treffen. Voraussetzung hierfür ist das Abkühlen des Bleches an ruhender Luft. Aufgrund der Nichtberücksichtigung des Wärmeaustausches mit der Umgebung unterscheidet man deswegen in zweidimensionale und dreidimensionale Wärmeableitung durch das geschweißte Blech.

Für dünne Bleche kann der Wärmetransport nur zweidimensional in der Blechebene erfolgen. Folglich verringert sich die $t_{8/5}$ -Zeit bei zunehmender Blechdicke, da hier die Wärmeableitung schneller durch den zusätzlichen Wärmetransport in Blechdickenrichtung erfolgt. In

der allgemeinen Gleichung nach Rosenthal [24] und Rykalin [25] wird die $t_{8/5}$ -Zeit unabhängig von der Blechdicke gemäß (2-16) berechnet.

$$t_{8/5} = \frac{\eta}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot \frac{U \cdot I}{v} \quad (2-16)$$

mit

η : thermischer Wirkungsgrad des Schweißverfahrens

λ : Wärmeleitfähigkeit des Stahles

U : Lichtbogenspannung

I : Schweißstrom

v : Schweißgeschwindigkeit

T_0 : Arbeitstemperatur

Weiterhin wurden in mehreren Schritten weitere Einflussfaktoren bestimmt. Für die zweidimensionale Wärmeableitung werden wie bereits o.a. die Werkstückdicke sowie die Dichte und die spezifische Wärmekapazität berücksichtigt.

Für den zweidimensionalen Fall kann $t_{8/5}$ mit Hilfe von Gleichung (2-17) und entsprechender Hilfswerte bestimmt werden. Für den dreidimensionalen Fall gilt Gleichung (2-18). Die Bestimmung der $t_{8/5}$ -Zeit erfordert die Berechnung beider Arten von Wärmeableitung (zwei- und dreidimensional). Der größere Wert ist von physikalischer Bedeutung und wird maßgebend.

$$t_{8/5} = (0,043 - 4,3 \cdot 10^{-5} \cdot T_0) \cdot \eta'^2 \cdot \frac{E^2}{d^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \right] \cdot F_2 \quad (2-17)$$

$$t_{8/5} = (0,67 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot T_0) \cdot \eta' \cdot E \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \right] \cdot F_3 \quad (2-18)$$

mit

η' : relativer thermischer Wirkungsgrad gemäß Bild 2-16

E : Streckenenergie $E = U \cdot I / v$

d : Blechdicke

$F_{2,3}$: Nahtfaktor für zwei- und dreidimensionale Wärmeableitung gemäß Tabelle 2-2

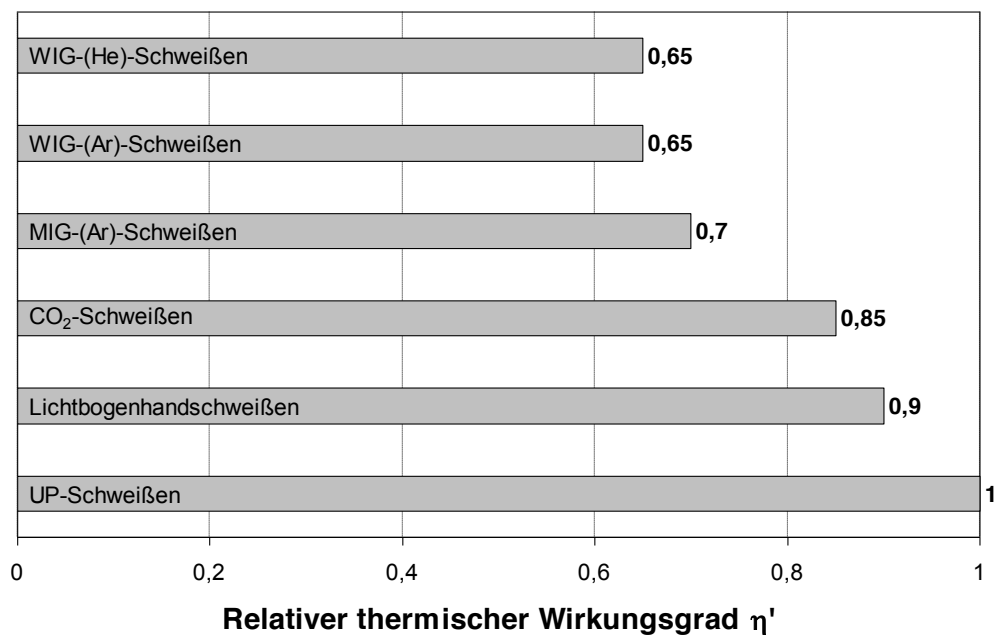
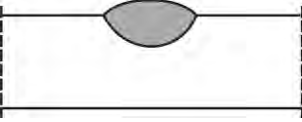
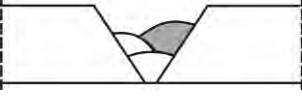
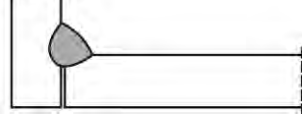
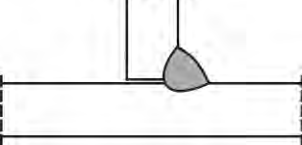


Bild 2-16 Relativer thermischer Wirkungsgrad verschiedener Schweißverfahren [23]

Tabelle 2-2 Nahtfaktoren für unterschiedliche Nahtvorbereitungen bei zwei (F_2) und dreidimensionaler (F_3) Wärmeableitung

Nahtart	Nahtfaktor	Nahtfaktor	
		Zweidimensionale Wärmeableitung F_2	Dreidimensionale Wärmeableitung F_3
Auftragsraupe 		1,0	1,0
Füllagen eines Stumpfholzes 		0,9	0,9
einlagige Kehlnaht am Eckstoß 		0,9 bis 0,67	0,67
einlagige Kehlnaht am T-Stoß 		0,45 bis 0,67	0,67

2.4.2 Experimentelle Ableitung der $t_{8/5}$ -Zeit

$t_{8/5}$ -Zeiten lassen sich weiterhin experimentell bestimmen. Dazu wird während des Schweißvorganges ein Thermoelement in das noch flüssige Schweißbad gedrückt. Besonders geeig-

net sind NiCr-Ni-Thermoelemente, vgl. Bild 2-17. Die experimentelle $t_{8/5}$ -Zeit-Messung im flüssigen Schweißbad erfordert Erfahrung und Fingerspitzengefühl. Nach der Messung verbleibt das Thermoelement in der Naht.



Bild 2-17 **NiCr-Ni Thermoelement**

3 Experimentelle Untersuchungen

Das Versuchsprogramm wurde gemäß des Forschungsantrages und des Finanzierungsplan festgelegt. Weiterhin wurden diejenigen Versuche aus dem Vorgängerprojekt [1] wiederholt, die aufgrund der ungünstigen Probenfertigung durch thermisches Trennen Aufhärtungen an den Probenrändern aufwiesen.

Es wurden zunächst sieben Bauteilproben durch die Fa. Züblin Stahlbau GmbH gefertigt. Diese bestanden aus drei Kreuzstoßverbindungen und vier Stumpfstoßverbindungen. Eine Probe der Kreuzstöße und zwei Stumpfstoßproben dienten zur Herstellung der notwendigen Kleinproben zur Materialcharakterisierung. Diese Materialparameter waren für die numerischen Berechnungen und die theoretische Analyse erforderlich. Alle Probekörper wurden aus Stahl S355J2 nach DIN EN 10025-2 [20] gefertigt.

Die Durchführung der experimentellen Arbeiten erfolgte am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen. Es stellte sich im Laufe der Forschungsarbeiten heraus, dass sich die Restspalte auch hier erneut aufgrund ungünstig verteilter Eigenspannungen nicht gleichmäßig infolge der Ermüdungsbeanspruchung ausbreiteten. Erfreulicherweise erklärte sich die Fa. Züblin bereit, jeweils drei neue Kreuz- und drei neue Stumpfstoßverbindungen mit Restspalten zu fertigen. Jeweils zwei dieser Probekörper wurden für die Bauteilversuche herangezogen und wurden vor Versuchsdurchführung zum Abbau der Eigenspannungszustände spannungsarm gegläht. Die verbleibenden Probekörper wurden der SLV Duisburg zur Validierung der Ultraschallmethoden überlassen.

Tabelle 3-1 zeigt das Bauteilprobenversuchsprogramm und Tabelle 3-2 die Matrix der Kleinprobenversuche.

Tabelle 3-1 Versuchsprogramm der Bauteilproben

Blechstand	Beanspruchung	Kreuzstoß	Stumpfnah
Kontakt (0mm)	Zug	2 (+2)	2 (+2)

Tabelle 3-2 Versuchsprogramm der Kleinproben (1 x Kreuzstoß + 2 x Stumpfstoß)

Versuch	Grundwerkstoff	DHV-Naht	Stumpfnah	Summe
Chemische Analyse	1	1	1	3
Rissfortschrittsversuche	3	3	3	9
Metallographie	1	1	1	3
Härtemessungen	1	1	1	3
Kerbschlagbiegeversuche	20	20	20	60
Zugversuche	3	3	3	9

Weiterhin wurden im Vorfeld Probeschweißungen an Stumpfstoßverbindungen durchgeführt, um Schweißnähte mit Zähigkeitseigenschaften an den Grenzen der Produktnormen herzustellen.

3.1 Herstellung von Schweißnähten mit kontrollierten Zähigkeitseigenschaften durch Probeschweißungen

In [1] wiesen sowohl der Grundwerkstoff als auch die Schweißnähte besonders gute Zähigkeitseigenschaften auf, vgl. Bild 1-3. Nach Auswertungen der Kerbschlagarbeits-Temperaturkurven wurden konservativ Übergangstemperaturen in Höhe von $T_{27J} = T_{40J} = -80^{\circ}\text{C}$ ermittelt. Beim vorliegenden Material S355J2 fordern die Produktnormen [20] eine Mindestzähigkeit von 27J bei nur -20°C . Aus diesem Grund sollten die so in [1] ermittelten Ergebnisse mit Schweißnähten hoher Zähigkeit mit Ergebnissen an Schweißnähten mit geringer Zähigkeit verglichen werden. Dazu wurden Probeschweißungen bei der Fa. Züblin Stahlbau GmbH in Hosena durchgeführt. Ziel ist es, Materialeigenschaften in der Verbindung zu erzeugen, die ein weniger „gutmütiges“ Gefüge aufweisen. Durch Variation der entsprechenden Schweißparameter soll ein Gefüge mit martensitischen Anteilen eingestellt werden, so dass die erforderlichen mechanischen und chemischen Eigenschaften nach DIN EN 10025 innerhalb der Anwendungsgrenzen gerade noch erfüllt werden

3.1.1 Herstellung der Probekörper

Zur Herstellung der Probekörper wurden jeweils zwei Bleche des Grundmaterials benötigt, das auch für die spätere Herstellung der eigentlichen Probekörper verwendet werden soll. Es ergeben sich letztendlich acht Bleche (S355J2) mit den Abmessungen 500 x 500 x 40 mm, Bild 3-1, links. Die Bleche wurden mechanisch getrennt und zugeschnitten, um Aufhärtungen an den Rändern, z.B. durch thermische Trennverfahren, zu vermeiden.

Die Nahtvorbereitung erfolgte ebenso mechanisch. Die Schnittflächen entsprechen der Güte 1 nach DIN EN ISO 9010. Damit die Wärmeeinflusszone bei den späteren Zähigkeitsprüfungen zuverlässig erfasst werden konnte, musste mindestens eine Flanke der Naht zur Plattenoberfläche senkrecht stehen. Der Nahtöffnungswinkel beträgt 50° , Bild 3-1, rechts. In der bearbeiteten Blechmitte sollte ein 6 mm breiter Steg stehen bleiben. Beim Schweißen wurde dieser Steg nicht ausgearbeitet. Ziel war es, eine Schweißverbindung mit einem Restspalt von $3 \leq t \leq 6$ mm herzustellen. Die Einzelbleche wurden unter Kontakt mit Luftspalt = 0 mm verschweißt.

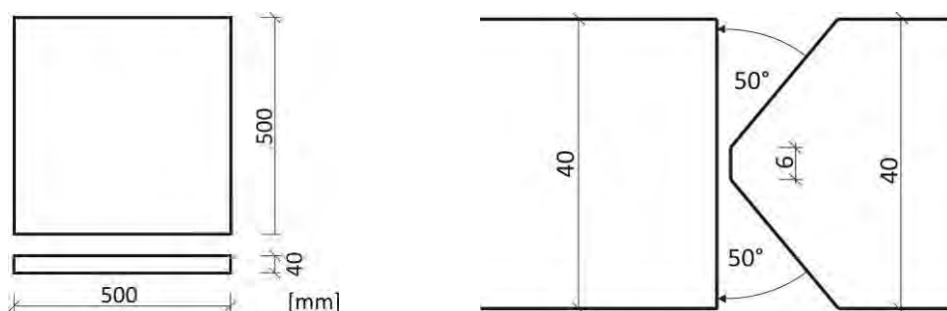


Bild 3-1 Grundmaterial und Nahtvorbereitung

Die Schweißbereiche wurden von Rost, Zunder und anderen schädlichen Verunreinigungen befreit. Als Schweißverfahren kam entsprechend dem Vorgängerprojekt das Metall-Aktivgas-Schweißverfahren mit Massivdrahtelektrode (MAG(t) – 135, teilmechanisiert) zum Einsatz. Es wurden An- und Auslaufbleche verwendet. Eine exemplarische Schweißanweisung der Fa. Züblin Stahlbau GmbH kann Anhang A.1 entnommen werden. Die Orientierung der Bleche wurde so vorgenommen, dass die Schweißnaht quer zur Walzrichtung der Bleche verläuft, Bild 3-2.

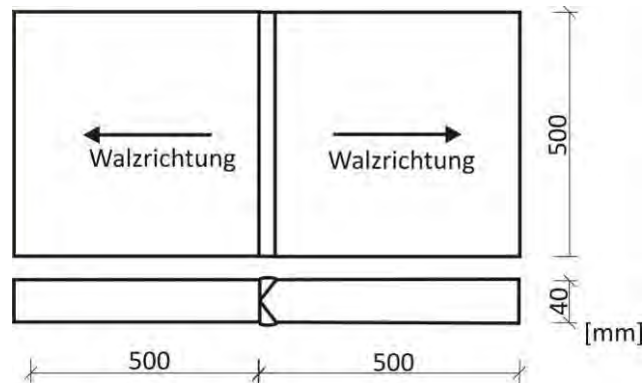


Bild 3-2 Probekörper für Probeschweißung

3.1.2 Versuchsdurchführung – Teil 1

3.1.2.1 Schweißen der Bleche und $t_{8/5}$ -Zeit-Messung

Die Probeschweißungen wurden bei der Fa. Züblin Stahlbau GmbH in Hosena durchgeführt. Die $t_{8/5}$ -Zeit-Messung erfolgte durch die SLV Duisburg in Probenmitte. In Schweißnahtmitte erfolgte keine vollständige Bestimmung des Temperaturverlaufs, sondern nur die Erfassung der Zeit beim Abfall der Temperatur von 800°C auf 500°C. Während der Versuchsdurchführung wurden die Schweißparameter (Schweißzeit, Schweißgeschwindigkeit, Stromstärke und Spannung) direkt an der Stromquelle abgenommen, Bild 3-3.



Bild 3-3 Messeinrichtung zur Messung der $t_{8/5}$ -Zeiten

Die Zwischenlagentemperatur wurde teilweise protokolliert. Die Schweißung erfolgte in PA-Lage mit An- und Auslaufblechen, Bild 3-4. Die Bleche wurden während des Lagenschwei-

ßens zur Vermeidung von Verzug gedreht. Die Lagenummerierung erfolgt fortlaufend und gibt somit an, wann das Blech gedreht wurde.



Bild 3-4 Ungeschweißte Bleche, An- und Auslaufbleche



Bild 3-5 Versuchsdurchführung, $t_{8/5}$ -Zeit Messung


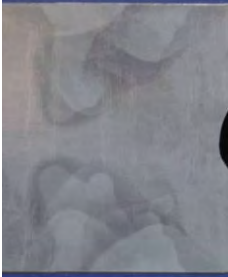


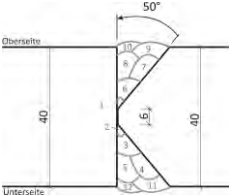
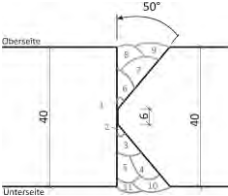
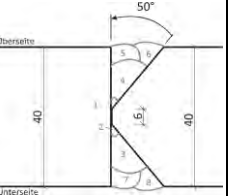
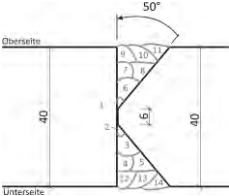
Es wurden vier Probekörper mit unterschiedlichen Streckenenergien geschweißt. Die Probekörper wurden vereinfacht fortlaufend durchnummeriert. Am Institut für Eisenhüttenkunde wurden Makroschliffe der einzelnen Proben hergestellt, vgl. Tabelle 3-3 sowie Anhang A.6, Weiterhin wurde der über die Raupenzahl gemittelte Wert der Streckenenergie angegeben.

Anhang A.3 zeigt für die Probekörper detailliert die an der Stromquelle direkt abgegriffenen Parameter. Die Zwischenlagentemperatur wurde bei den ersten beiden Probeschweißungen nicht vollständig protokolliert. Weiterhin sind die $t_{8/5}$ -Zeiten der einzelnen Schweißraupen an-

gegeben. Aufgrund der großen Sensibilität des Verfahrens konnten einige Temperaturen nicht bestimmt werden.

Schweißstrom und Schweißspannung wurden für jede Lage kontinuierlich gemessen. Hier kann von vornehmlich über Zeit konstanten Parametern ausgegangen werden. Exemplarisch ist dazu das Monitoring dieser Parameter an der Probe 04 für die Raupe 2 im Anhang A.4 dargestellt.

Tabelle 3-3 Probeschweißungen, Makroschliff, Streckenenergie

Probe	01	02	03	04
Schliffbild				
Lagen- aufbau				
Raupen- anzahl	12	11	8	14
Strecken- energie E, gemittelt [kJ/cm]	16,33	19,93	29,16	13,79

3.1.2.2 Vergleich der gemessenen und experimentell bestimmten Werte der $t_{8/5}$ -Zeiten

Zur Verifikation wurden die gemessenen $t_{8/5}$ -Zeiten mit denjenigen aus Gleichung (2-17) und (2-18) gegenübergestellt. Wie zu erwarten war, werden entsprechend der dicken Bleche die für den dreidimensionalen Wärmetransport ermittelten $t_{8/5}$ -Zeiten maßgebend. Die detaillierten Ergebnisse können Anlage A.5 entnommen werden.

Der graphische Vergleich gemäß Bild 3-6 zeigt eine gute Übereinstimmung der experimentell und theoretisch ermittelten Werte mit leichten Konservativitäten auf der Berechnungsseite. Lediglich ein Wert bei der Probe „04“ wird von der Handrechnung unterschätzt ($\Delta t_{8/5} = 0,5$ °C).

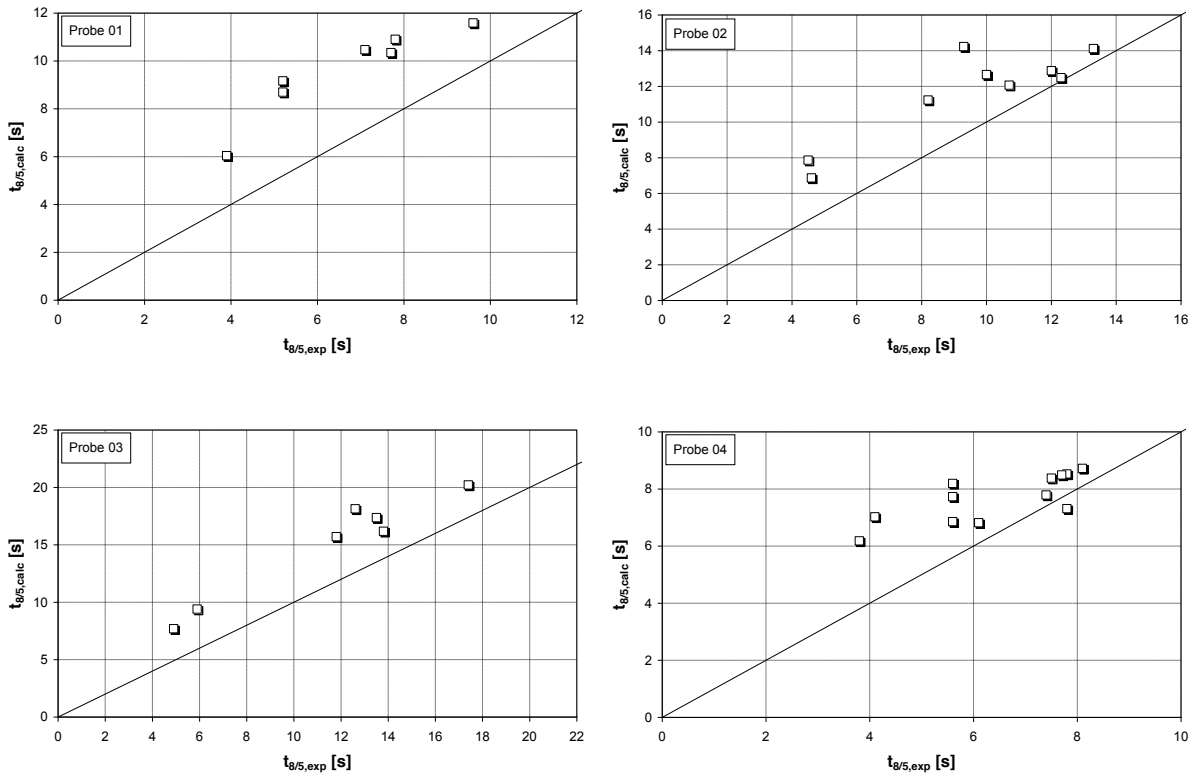


Bild 3-6 Versuchsdurchführung, $t_{8/5}$ -Zeit Messung

Für die nachfolgende Korrelation mit den Zähigkeitswerten erfolgt im nächsten Schritt eine Darstellung der $t_{8/5}$ -Zeit für die Wurzellage, die Fülllagen und die Decklagen, jeweils getrennt für die obere und untere Schweißnaht, Bild 3-7. Dazu wurde bei mehreren Lagen (Füll- und Decklagen) der Mittelwert gebildet. Das Diagramm enthält sowohl die experimentell bestimmten Kennwerte (schattiert) als auch die rechnerisch ermittelten Werte (schraffiert).

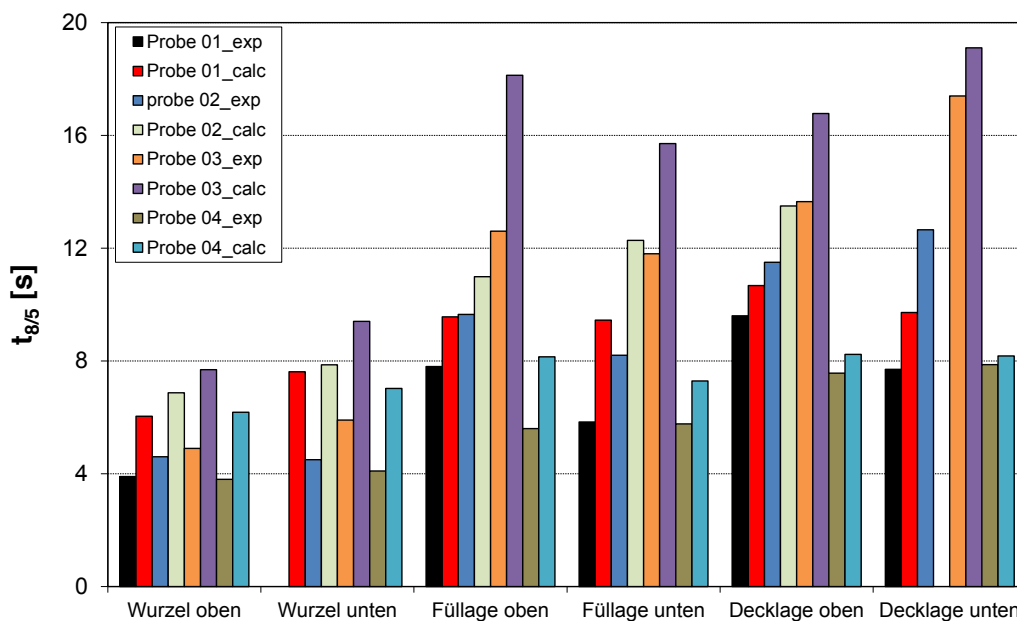


Bild 3-7 $t_{8/5}$ -Zeiten getrennt nach Wurzel-, Füll- und Decklage

Ergänzend sind in Bild 3-8 die Mittelwerte der lagenabhängigen Streckenenergien gegeben.

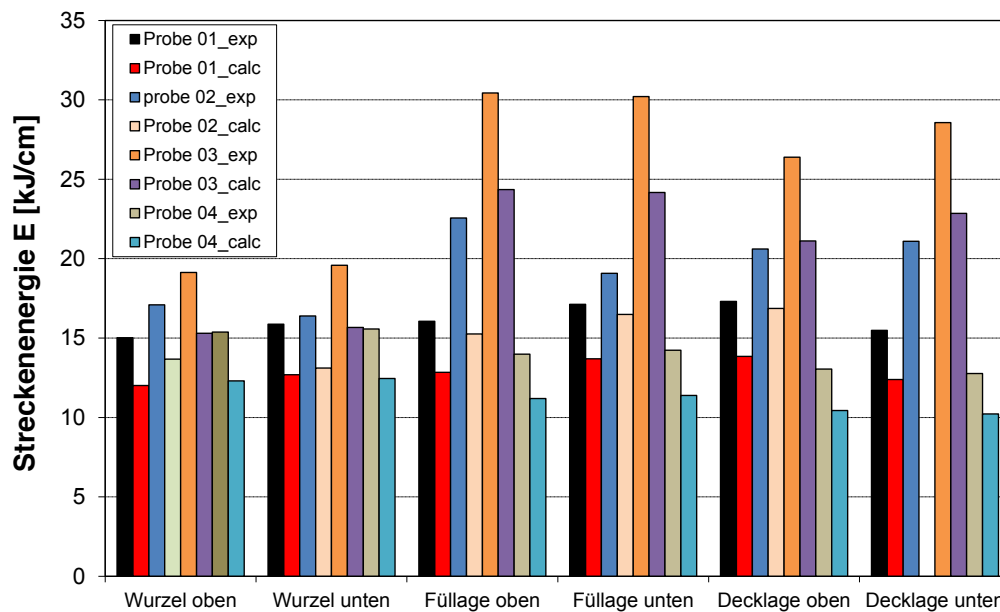


Bild 3-8 Streckenenergie getrennt nach Wurzel-, Füll- und Decklage

Aus beiden Diagrammen ist deutlich zu erkennen, dass die Wurzellagen der Proben 01 und 04 mit ähnlichen Schweißparametern geschweißt wurden. Bei den Füll- und Decklagen wurden bei der Probe 04 kleinere Schweißraupen gelegt, so dass hier mit geringerer Streckenergie gearbeitet wurde. Hinsichtlich der erzielten $t_{8/5}$ -Zeiten kann dieser Trend nicht bestätigt werden, da die Abkühlzeiten durch die Zwischenlagentemperaturen beeinflusst werden.

Die Proben 02 und 03 wurden dahingegen mit größerer Streckenenergie geschweißt, sowohl Wurzel-, Füll- und Decklagen. Dementsprechend werden auch hier längere Abkühlzeiten erzielt.

Für die weitere Berechnung hinsichtlich der Zähigkeitskorrelation (vgl. Abschnitt 3.1.3.1) ist es aufgrund der Kerbschlagprobegeometrie sowie der Lage der Kerbschlagprobe empfehlenswert, die für die Korrelation notwendige $t_{8/5}$ -Zeit über alle Schweißraupen zu mitteln, da der Kerb sowohl in der Wurzel-, Füll- und Decklage liegt.

Entsprechend der Entnahmestellen der Kerbschlagproben ergeben en sich somit die Streckenenergien und $t_{8/5}$ -Zeiten nach Tabelle 3-4. Es ist anzumerken, dass die Streckenenergie nicht den Einfluss der Zwischenlagentemperatur widerspiegelt.

Tabelle 3-4 Gemittelte Streckenenergie und $t_{8/5}$ -Zeit

		Probe 01	Probe 02	Probe 03	Probe 04
Werkstückseite		unten	oben	oben	unten
Streckenenergie E [kJ/cm]	experimentell	16,37	20,69	25,59	13,80
	analytisch	13,09	16,55	20,47	11,04
Abkühlzeit $t_{8/5}$ [s]	experimentell	6,3	9,4	11,2	6,4
	analytisch	9,2	11,7	14,8	7,6

3.1.3 Versuchsdurchführung – Teil 2

Ziel ist es, die Schweißparameter mit den in den Schweißnähten erzielten Zähigkeitswerten zu korrelieren. Das Vorgehen für die folgenden Untersuchungen erfolgt analog zu SEP 1202 „Ermittlung des Einflusses der Schweißbedingungen auf die Zähigkeit in der Wärmeeinflusszone von Mehrlagenverbindungen“ [27].

3.1.3.1 Zähigkeitsuntersuchungen

Nach dem Schweißen wurden Zähigkeitsuntersuchungen an den Schweißverbindungen durchgeführt. Dazu wurden vollständige Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurven für die Probekörper erstellt. Die Kerbschlagproben und die Durchführung der Kerbschlagversuche erfolgte gemäß DIN EN 10045 [26]. Bei jeder einzelnen Probe wurde nach dem Versuch der Bruchverlauf überprüft.

Im mittleren Probekörperbereich ist die Schweißnaht nicht homogen, da die Thermoelemente im Schweißgut verblieben sind. Deshalb ist dieser Bereich sowie der Probenrandbereich zur Herstellung der Kerbschlagproben nicht zu verwenden (vgl. Bild 3-9).

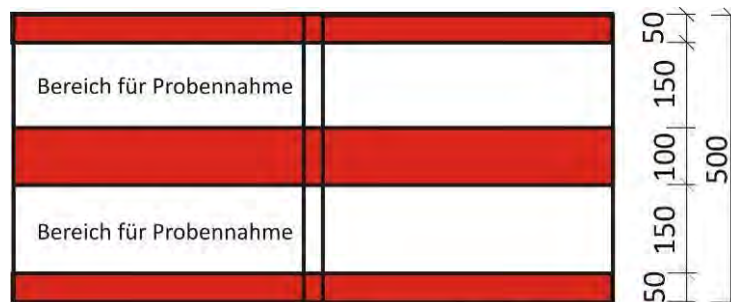


Bild 3-9 Probennahme Kerbschlagproben

Der Probenkerb (ISO-V-Proben) wurde dabei im Grobkornbereich der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht (Doppel-HY-Naht) angeordnet, und zwar an der senkrechten Steiflanke gemäß Bild 3-10. Dies entspricht ungefähr einem Abstand von ca. 0,5 mm zwischen Kerb in der Wärmeeinflusszone und der Schmelzlinie. Zur genauen Positionierung der Kerbe wurde jeder der entnommenen Rohlinge der Kerbschlagproben angeätzt und für jede einzelne Probe die Kerblage vorgegeben.

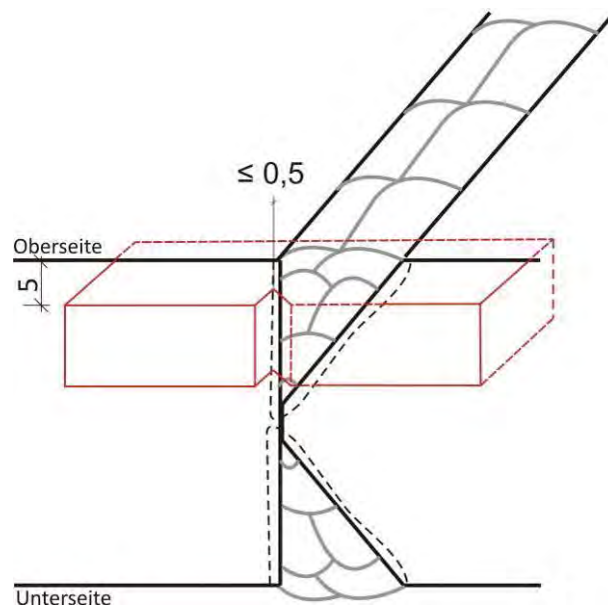


Bild 3-10 Lage der Kerbschlagproben

Des Weiteren wurde zwischen Werkstückoberfläche und der nächstgelegenen Probenoberfläche ein Abstand von rd. 5 mm eingehalten. Die Kerbschlagproben wurden entweder vollständig aus der oberen bzw. vollständig aus der unteren Schweißnaht der DHY-Naht entnommen.

- Probe 01: Kerbschlagproben aus der Werkstückunterseite
- Probe 02: Kerbschlagproben aus der Werkstückoberseite
- Probe 03: Kerbschlagproben aus der Werkstückoberseite
- Probe 04: Kerbschlagproben aus der Werkstückunterseite

3.1.3.2 Ergebnisse

Je Schweißnaht wurden 15 Kerbschlagproben gefertigt. Die KV-T-Kurven sind in Bild 3-11 bis Bild 3-14 dargestellt. Da die Positionierung der Kerbe in der Grobkornzone der WEZ nur augenscheinlich erfolgen konnte, kommt es zu mehr oder weniger großen Streuungen. Diese sind bei Schweißnähten jedoch üblich.

Fast alle Kerbschlagproben wurden zur Ermittlung der T_{27J} bzw. T_{40J} -Temperatur herangezogen. Lediglich für die Probe 02 wurde ein Ausreißer mit ungewöhnlich hoher Kerbschlagarbeit identifiziert. Drei weitere Kerbschlagproben bei -60°C lieferten wesentlich geringere Werte gleicher Größenordnung.

KV-T-Kurven können üblicherweise durch „Tangenshyperbolicus-Funktionen“ approximiert werden. Die allgemeine Form lautet:

$$KV = A \cdot \left[1 + \tanh\left(\frac{T-B}{C}\right) \right] \quad (3-1)$$

Dabei ist KV die Kerbschlagarbeit in [J] und T die Werkstofftemperatur in [$^{\circ}\text{C}$]. A, B und C sind Konstanten, die über die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt wurden.

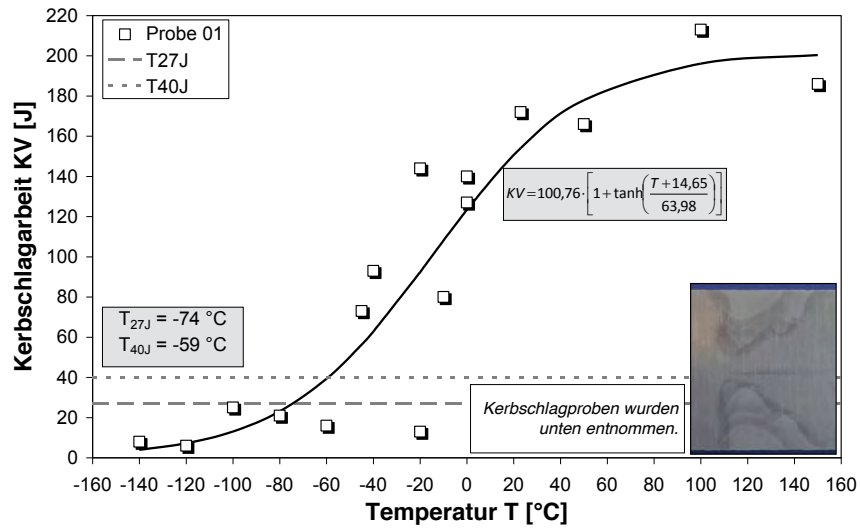


Bild 3-11 Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve für Probe 01

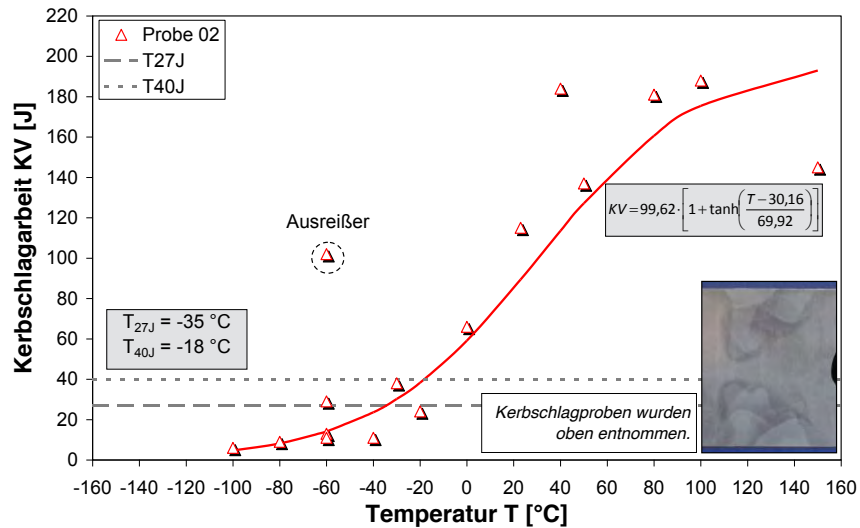


Bild 3-12 Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve für Probe 02

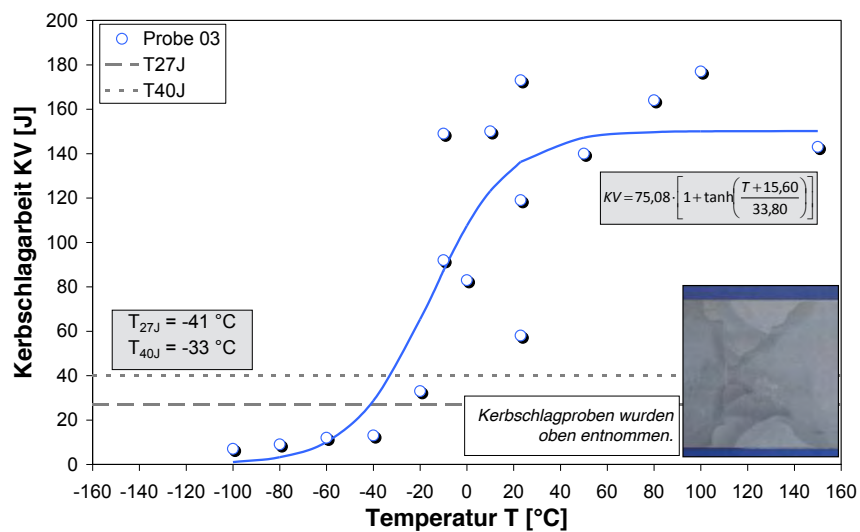


Bild 3-13 Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve für Probe 03

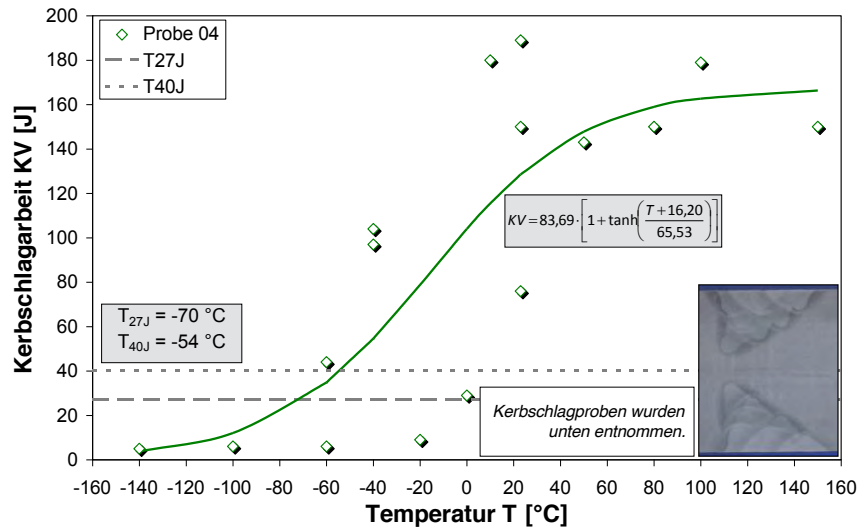


Bild 3-14 Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve für Probe 04

Die ermittelten Zähigkeitskennwerte sind in Form der üblichen Übergangstemperaturen T_{27J} bzw. T_{40J} in Tabelle 3-5 angegeben.

Tabelle 3-5 Übergangstemperaturen T_{27J} und T_{40J}

	Probe 01	Probe 02	Probe 03	Probe 04
T_{27J} [°C]	-74,3	-34,6	-41,2	-70,2
T_{40J} [°C]	-59,3	-18,1	-32,7	-54,1

3.1.4 Schlussfolgerungen

Die oben ermittelten Zähigkeitskennwerte wurden den experimentell und rechnerisch bestimmten $t_{8/5}$ -Zeiten gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind Bild 3-15 zu entnehmen. Die hier berücksichtigte $t_{8/5}$ -Zeit stellt den Mittelwert aus Wurzel-, Füll- und Decklagen dar, da die Breite der Kerbe der Charpy-Proben diese Bereiche vollständig abdeckt.

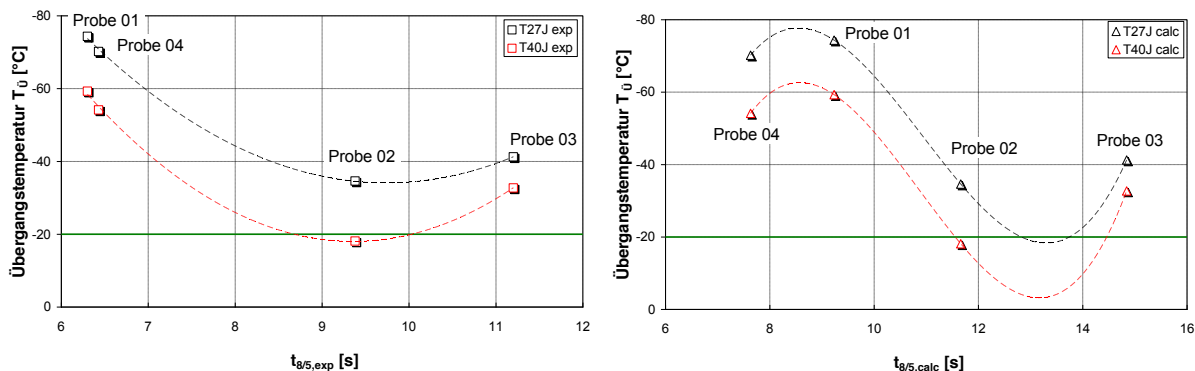


Bild 3-15 Zähigkeitswerte der Schweißnaht in Abhängigkeit unterschiedlicher $t_{8/5}$ -Zeiten

Ein Zähigkeitsminimum wurde für die Schweißnaht der Probe 02 für $t_{8/5} = 9,38$ s erreicht. Die beste Schweißung hinsichtlich Zähigkeit stellten die Proben 01 bzw. 04 dar. Es ist ein allgemeiner Trend zu erkennen, dass mit zunehmender $t_{8/5}$ -Zeit, die Übergangstemperatur an-

steigt und die Kerbschlagarbeit bzw. die Zähigkeit geringer wird. Die Übergangstemperaturkurve mit rechnerisch ermittelten Abkühlzeiten zeigt einen ähnlichen Trend mit leichten Differenzen zwischen Probe 01 und Probe 04. Probe 03 kann diese Trends dennoch nicht bestätigen. Dies ist jedoch auf die verhältnismäßig große Streckenenergie und den instabilen Lichtbogen bei dieser Probeschweißung zurückzuführen.

Für den eingesetzten Stahl S355 der Güte J2 werden gemäß DIN EN 10025-2 Mindestkerbschlagwerte von 27 J bei -20°C gefordert. Anhand der dokumentierten Untersuchungen können für die Rissfortschrittsversuche folgende Rückschlüsse bzgl. der Schweißnahtzähigkeiten gefolgert werden:

- Die Hauptprobekörper für die kombinierten Rissfortschritts- und Sprödbbruchversuche sind mit ähnlichen Parametern wie bei der Probeschweißung 02 zu schweißen.
- Die anzustrebende $t_{8/5}$ -Zeit (Experimentwert) sollte etwa 8 s betragen. Der rechnerische Wert in etwa 12 s.
- Der Lagenaufbau der DHY-Nähte sollte dabei 5-lagig sein (jeweils 1 Wurzellage, 2 Füllagen, 2 Decklagen), siehe auch Bild 3-16.
- Die folgenden Parameter, Tabelle 3-6, wurden entsprechend der korrelierten rechnerischen Ergebnisse mit den Versuchsergebnissen ermittelt und sind für die folgenden Schweißungen verwendet worden. Die Zwischenlagentemperatur von 160°C soll dabei explizit eingehalten werden.

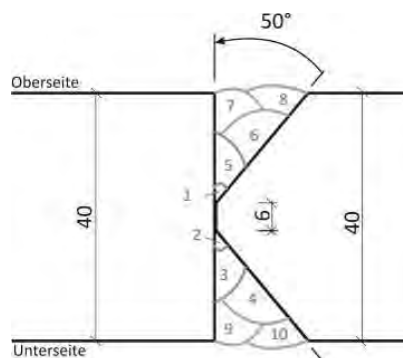


Bild 3-16 Lagenaufbau für Bauteilproben (Kreuzstoß analog)

Tabelle 3-6 Sollwerte (rechnerisch) Schweißparameter für Hauptversuche

	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Streckenenergie [kJ/cm]	Zwischenlagentemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	$t_{8/5}$ [s]
Wurzellage	32	280	34	17,33	0	7,0
Fülllage	29,5	325	34	22,47	160	14,1
Decklage	32,8	320	34	19,90	160	12,5
						12,1

Es ist von großer Wichtigkeit, dass die Hauptprobekörper mit denselben Geräten und Schweißzusatzwerkstoffen geschweißt werden, wie die Probeschweißungen.

3.2 Hauptversuchsprogramm an Kreuz- und Stumpfstoßverbindungen

Bei der Herstellung der Bauteilproben wurden die Schweißparameter gemäß Tabelle 3-6 verwendet. Die Probekörper wurden bei der Fa. Züblin Stahlbau GmbH, Hosena gefertigt.

Es wurden zunächst drei Kreuzstoßproben und drei Stumpfstoßproben mit DHY-Schweißnaht und einer Nahtvorbereitung von 50° gefertigt, vgl. Bild 3-1. Jeweils zwei Proben der unterschiedlichen Bauteilarten wurden zur Materialcharakterisierung herangezogen. Bei den Stumpfstoßproben wurde eine zusätzliche vierte Probe abweichend mit einem Nahtöffnungswinkel von 42° gefertigt, vgl. Tabelle 3-7, um so den Einfluss des Nahtöffnungswinkels auf die Zähigkeitseigenschaften zu untersuchen.

Es war im Laufe des Forschungsprojektes notwendig, zusätzliche Kreuz- und Stumpfstoßproben herzustellen, da die ersten Restspaltversuche nicht die gewünschten Ergebnisse lieferten, vgl. Abschnitt 3.3.3. Aus diesem Grund hat die Fa. Züblin jeweils drei weitere Restspaltproben mit DHY-Naht zur Verfügung gestellt, die sowohl für die Spröbruchversuche als auch für weiterführende Ultraschalluntersuchungen der SLV Duisburg verwendet wurden.

Tabelle 3-7 Probekörper für das Hauptversuchsprogramm

Nr.	Bauteil	Nahtform	Nahtvorbereitung	Bezeichnung	
1	Kreuzstoß	DHY	50°	DHY-N1	V
2	Kreuzstoß	DHY	50°	DHY-N1-2	V
3	Kreuzstoß	DHY	50°	DHY-N2	V
4	Kreuzstoß	DHY	50°	DHY-N2-2	V
5	Kreuzstoß	DHY	50°	DHY-N3	M
6	Kreuzstoß	DHY	50°	DHY-N3-2	UT
7	Stumpfstoß	DHY	50°	DHY-N4	V
8	Stumpfstoß	DHY	50°	DHY-N4-2	V
9	Stumpfstoß	DHY	50°	DHY-N5	V
10	Stumpfstoß	DHY	50°	DHY-N5-2	UT
11	Stumpfstoß	DHY	50°	DHY-N6	M
12	Stumpfstoß	DHY	50°	DHY-N6-2	V
13	Stumpfstoß	DHY	42°	DHY-N7	M

M: vorgesehen zur Materialcharakterisierung

V: vorgesehen für die Spröbruchversuche

UT: vorgesehen für weiterführende Ultraschalluntersuchungen der SLV

3.2.1 Materialcharakterisierung der Proben DHY-N1 – DHY-N7

Die Werkszeugnisse des Grundmaterials S355J2+N der ersten Proben DHY-N1 bis DHY-N7 sind in Anhang B.1 dargestellt. Die zugehörige Chargennummer lautet 569983. Die Anforderungen der DIN EN 10025-2 werden eingehalten, wobei das Grundmaterial als „ausreichend zäh“ zu bewerten ist.

- Streckgrenze $f_y(t = 40 \text{ mm}) = 352 \text{ N/mm}^2$
- Zugfestigkeit $f_u(t = 40 \text{ mm}) = 531 \text{ N/mm}^2$
- Bruchdehnung $A_5 = 26 \%$
- Kerbschlagzähigkeit $KV = 48 \text{ J}$

Es wurden Kleinteilversuche zur Materialspezifizierung der Schweißungen durchgeführt. Diese Kennwerte dienten als Eingangswerte für die Nachrechnung der Bauteilversuche. Insbesondere wurden deswegen

- die bruchmechanischen Werkstoffkonstanten C und m zur Berechnung des Rissfortschrittes nach der Paris-Gleichung sowie
- die Festigkeits- und Zähigkeitswerte im Anschlussbereich zur Nachrechnung des statischen Resttragversuchs bei tiefen Temperaturen

ermittelt. Weiterhin wurden Härteuntersuchungen, chemische Analyse und eine Metallographie der Anschlussbereiche durchgeführt. Das Material für die Kleinproben wurde vorwiegend dem Schweißnahtanschluss (Schweißgut und Wärmeeinflusszone) entnommen.

3.2.1.1 Chemische Analyse

Das Material für die chemische Analyse wurde dem Grundwerkstoff und aus der Schweißnaht entnommen. Das Ergebnis kann Tabelle 3-8 entnommen werden.

Tabelle 3-8 Chemische Zusammensetzung [Mass. %], Hauptbestandteile

Chemische Zusammensetzung	C	Si	Mn	P	S	Cu
Anforderung gemäß DIN EN 10025-2	0,23	0,60	1,70	0,035	0,035	0,60
DHY-N3 (Kreuzstoß)						
Grundwerkstoff [%]	0,134	0,331	1,43	0,0113	0,0166	0,1700
Schweißnaht [%]	0,0760	0,690	1,33	0,0130	0,0102	0,0794
DHY-N6 (Stumpfstoß)						
Grundwerkstoff [%]	0,141	0,336	1,44	0,0114	0,0178	0,1740
Schweißnaht [%]	0,0914	0,637	1,29	0,0110	0,0091	0,0744
DHY-N7 (Stumpfstoß)						
Grundwerkstoff [%]	0,143	0,332	1,43	0,0117	0,0162	0,1680
Schweißnaht [%]	0,0749	0,577	1,30	0,0078	0,0164	0,0846

Die Analyse zeigt, dass die Vorgaben der DIN EN 10025 für den Grundwerkstoff eingehalten sind. Aufgrund des verwendeten G4Si1-Zusatzwerkstoffes (MnSi-legiert) zeigt das Schweißgut erhöhte Anteile an Silizium.

3.2.1.2 Metallographie

Die metallographische Analyse wurde für die Schweißverbindungen an den Proben DHY-N3, DHY-N6 und DHY-N7 durchgeführt und ist in Anhang B.2 detailliert dargestellt. Die Makroschliffe der Schweißstöße auf Bild B-2, Bild B-8 und Bild B-14 zeigen neben den Brennflecken der Spektralanalyse Mittenseigerungen angehäufter Mangan-Sulfid-Zeilen. Sonst weist der Stahl einen hohen Reinheitsgrad auf, der durch einen sehr geringen Anteil an nichtmetallischen sulfidischen Einschlüssen gekennzeichnet ist. Der Grundwerkstoff zeigt ein feinkörniges ferritisch-perlitisches Gefüge mit zeiliger Struktur, vgl. Bild B-5, Bild B-11 und Bild B-17.

In Bild B-3, Bild B-9 und Bild B-15 ist der gesamte Bereich der Wärmeeinflusszone (Grobkornzone, Feinkornzone) und des anschließenden Grundwerkstoffs dargestellt. Das Schweißgut (Bild B-4, Bild B-10, Bild B-16) weist ein typisch homogenes, leicht nadelförmiges, ferritisch-bainitisches Gefüge auf. In der Wärmeeinflusszone sind typischerweise Schichten grobkörniger Struktur erkennbar (Bild B-6, Bild B-12, Bild B-18), die bainitisch-martensitische Anteile aufweisen. In der Feinkornzone ist das Gefüge ferritisch-perlitisch-bainitisch geprägt und zeigt eine zeilige Struktur, vgl. Bild B-7, Bild B-13 und Bild B-19.

Insgesamt sind keine besonderen Verunreinigungen oder andere Gefügeinhomogenitäten im Schweißgut oder der Wärmeeinflusszone festzustellen.

3.2.1.3 Zugversuche

Die einachsigen Zugversuche wurden unter quasistatischer Belastung an Rundzugproben nach DIN EN 10002-1 an B4x20 Proben gemäß DIN 50125 ermittelt, s. Bild 3-17.

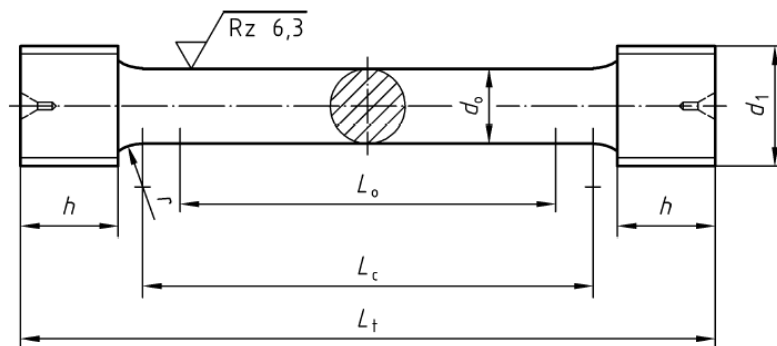


Bild 3-17 Zugform Probe B gemäß DIN 50125

Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt und es wurden sowohl die technische als auch die wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve bis zum Bruch bestimmt.

Von jeder Nahtgeometrie wurden drei Proben geprüft, um mögliche Streuungen, die besonders bei dieser kleinen Probengeometrie auftreten könnte, zu kompensieren. Bild 3-18 zeigt die Lage der Proben im Schweißanschluss.

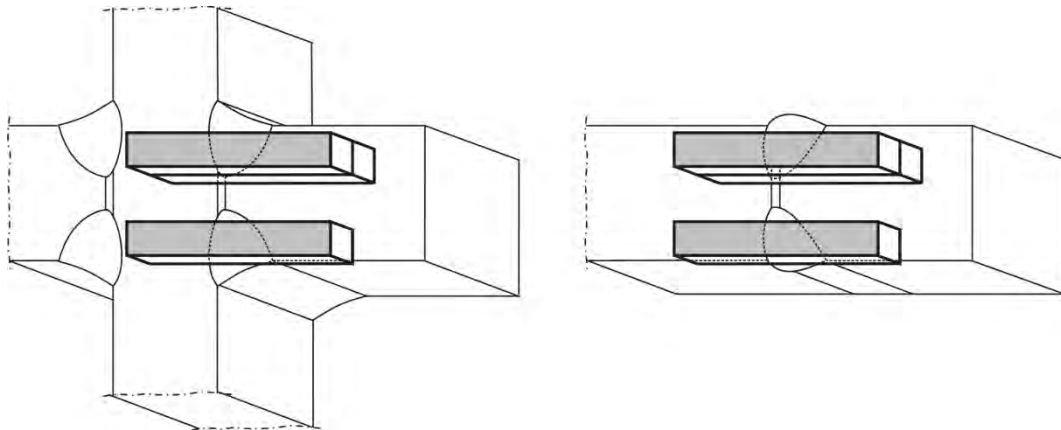


Bild 3-18 Entnahme der Rohlinge für die Zugproben aus den Schweißanschlüssen

Tabelle 3-9 enthält die ermittelten Festigkeitskennwerte. Die Streckgrenzenwerte des Grundwerkstoffs und diejenigen, die unter Berücksichtigung des Schweißguts ermittelt wurden, erfüllen die Anforderungen nach DIN EN 10025-2. Wenn keine obere bzw. untere Streckgrenze ermittelbar war, wurde der $R_{p0,2}$ -Wert bestimmt.

Tabelle 3-9 Kennwerte der Zugversuche der DHY-Nahtverbindungen

	Zugversuch nach DIN EN 10002-1					
	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_5 [%]
Anforderung gemäß DIN EN 10025-2	345	-	-	470-630	-	22
Grundwerkstoff	352	-	-	531	-	26
DHY-N3 (Kreuzstoß)	-	-	394	545	7,11	12,4
	-	-	393	554	7,70	13,6
	393	391	-	544	11,75	18,0
Mittelwert	393	391	394	548	8,85	14,7
DHY-N6 (Stumpfstoß)	386	378	-	547	6,47	15,6
	382	376	-	550	6,30	17,0
	387	362	-	540	9,41	17,6
Mittelwert	385	372	-	546	7,39	16,7
DHY-N7 (Stumpfstoß)	375	371	-	545	6,11	16,9
	340	338	-	540	8,70	20,3
	-	-	344	532	8,37	19,2
Mittelwert	358	355	344	539	7,73	18,8

A_g : nicht-proportionale Dehnung bei Höchstkraft

Die Proben, die mit einem Öffnungswinkel von 50° und mit den (Soll-)Schweißparametern gemäß Tabelle 3-6 geschweißt worden sind (DHY-N3 und DHY-N6), weisen höhere Festigkeitswerte auf als die Probe DHY-N7 mit einem Öffnungswinkel von 42° , die mit repräsentativen fertigungstechnischen Schweißigenschaften der Fa. Züblin geschweißt wurden. Hinsichtlich der Bruchdehnung verhält sich dieser Zusammenhang umgekehrt. Hier werden erwartungsgemäß bessere Dehnbeanspruchbarkeiten für die Probe DHY-N7 erzielt. Die ge-

messenen A_5 -Dehnungen des Schweißguts liegen im Gegensatz zum Grundwerkstoff unterhalb der geforderten Mindestwerte in DIN EN 10025-2.

In Bild 3-19 bis Bild 3-21 sind die konventionellen und die wahren Spannungs-Dehnungs-Kurven für die Proben DHY-N3 (Kreuzstoß), DHY-N6 (Stumpfstoß) und DHY-N7 (Stumpfstoß) dargestellt.

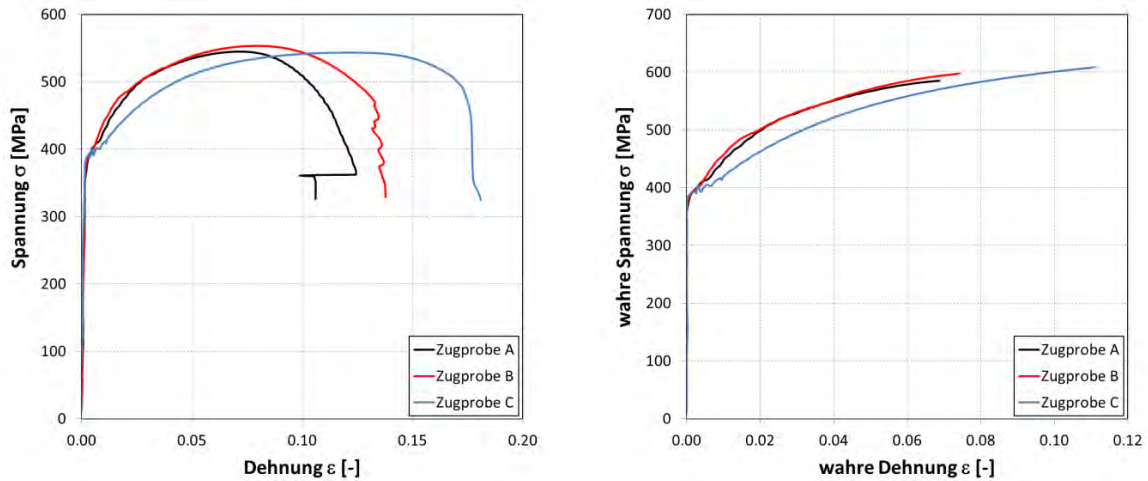


Bild 3-19 Technische Spannungs-Dehnung-Kurve (links), wahre Spannungs-Dehnung-Kurve (rechts) von Probe DHY-N3

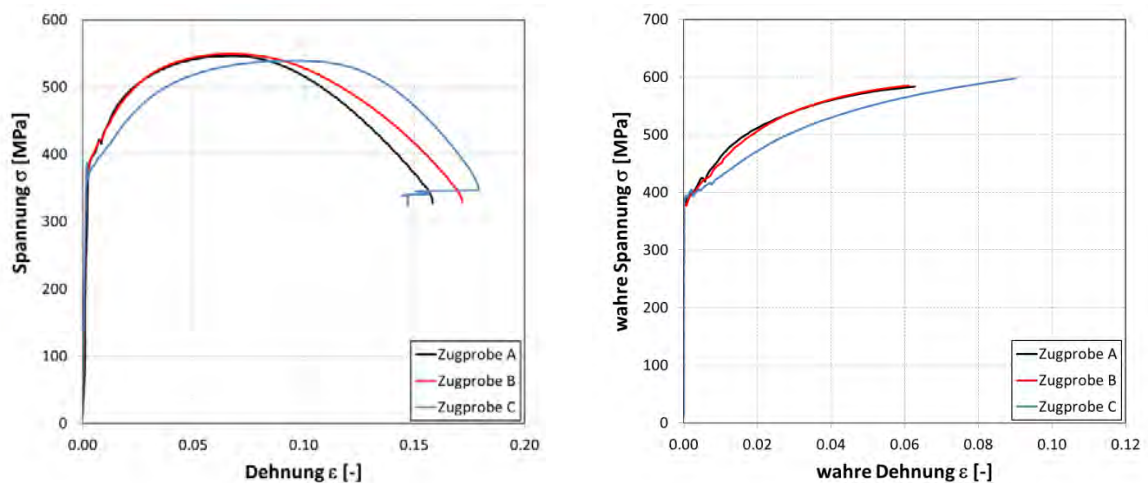


Bild 3-20 Technische Spannungs-Dehnung-Kurve (links), wahre Spannungs-Dehnung-Kurve (rechts) von Probe DHY-N6

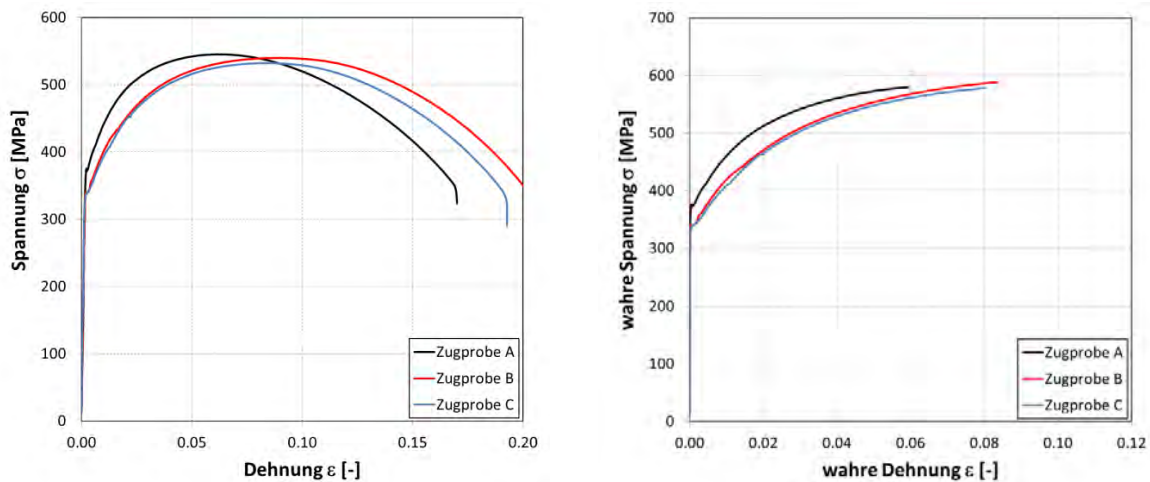


Bild 3-21 Technische Spannungs-Dehnung-Kurve (links), wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve (rechts) von Probe DHY-N7

3.2.1.4 Kerbschlagbiegeversuche

Zur Bestimmung der Zähigkeitseigenschaften der Schweißverbindungen wurden Kerbschlagversuche nach DIN EN 10045 mit Charpy-V-Kerb durchgeführt. Die Proben wurden analog zu Bild 3-10 an den Proben DHY-N3, DHY-N6 und DHY-N7 entnommen. Es wurden mit jeweils ca. 15 Kerbschlagproben komplette Temperaturübergangskurven ermittelt. Bei der Versuchsdurchführung wurde auf eine ausreichende Charakterisierung des Übergangsbereichs der Kerbschlagarbeit-Temperaturkurve Wert gelegt, um so auftretende Streuungen in diesem Bereich berücksichtigen zu können, Bild 3-22.

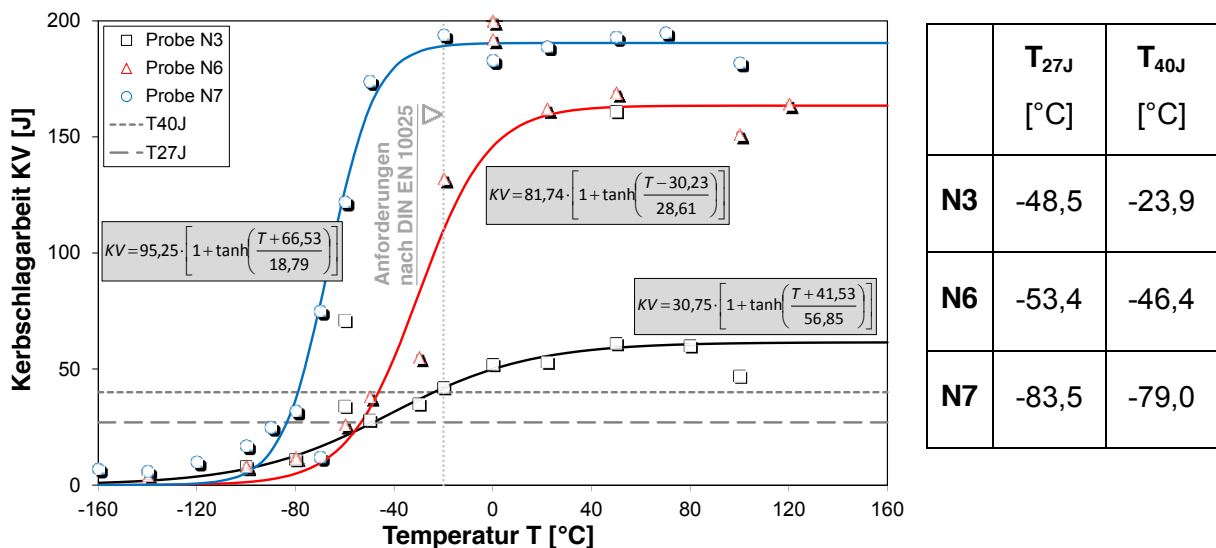


Bild 3-22 KV-T-Kurven für die Proben DHY-N3, DHY-N6 und DHY-N7

Mit der Näherungsfunktion gemäß Gl. (3-1) wurden an der Kreuzstoßprobe (DHY-N3) und der Stumpfstoßprobe (DHY-N6) T_{27J}-Temperaturen ermittelt. Diese T_{27J}-Temperaturen sind für Kreuz- und Stumpfstoß ähnlich und betragen für die Probe DHY-N3 -49 °C und für die Probe DHY-N6 -53 °C. Im Vergleich zu den mit identischen Schweißparametern hergestell-

ten Probeschweißungen sind die Zähigkeitswerte der Schweißverbindungen etwas besser. Die korrespondierenden T_{27J} -Temperaturen betragen für die Probeschweißung „Probe 02“ $-34,6\text{ °C}$, vgl. Abschnitt 3.1.3.2, Tabelle 3-5. Die Abweichungen zu diesen Sollwerten aus den Probeschweißungen betragen demnach im Schnitt ca. 15 K. Hinsichtlich der nicht präzise zu steuernden Vorgänge beim Handschweißen (z.B. Schweißgeschwindigkeit, Pendelbewegungen) und der unvermeidbaren Streuungen der Zähigkeitseigenschaften im Übergangsbereich der Zähigkeits-Temperaturkurve, insbesondere bei Schweißverbindungen, sind diese Abweichungen von den Soll-Werten als gering einzustufen. Das Ziel, Schweißverbindungen mit Zähigkeitseigenschaften an den unteren Grenzen der Normvorgaben herzustellen, wurde mit $T_{27J} = -50\text{ °C}$ ($< T_{27J,DIN EN 10025} = -20\text{ °C}$ für S355 J2) dennoch nicht vollständig erreicht. Dennoch sind die eingestellten Zähigkeiten im Übergangsbereich deutlich kleiner als diejenigen Zähigkeiten, die in [1] ermittelt wurden (im Vorgängerforschungsprojekt betragen diese -80 °C bei 27 J und 40 J). Die Untersuchungen lassen folgende Schlüsse zu:

- Das Reproduzieren von „Zähigkeitseigenschaften“ ist trotz der durchgeführten Voruntersuchungen ($t_{8/5}$ -Zeit-Messung und der damit verbundenen Zähigkeitskorrelation) bei Handschweißprozessen schwierig.
- Die Streuungen in einem automatisierten Schweißprozess werden im Vergleich zum manuellen Schweißen deutlich reduziert und würden zu genaueren Ergebnissen führen. Im Rahmen des Projektes war dies jedoch nicht möglich.

Es ist jedoch zu betonen, dass alle untersuchten Proben im Gegensatz zu den Untersuchungen in [1] im Bereich -20 °C eindeutig Tieflagen- bzw. Übergangverhalten aufweisen.

Ein Blick auf den Hochlagenbereich der an den Proben DHY-N3 und DHY-N6 ermittelten Zähigkeiten zeigt jedoch deutliche Abweichungen. Während für die Probe DHY-N6 (Stumpfstoß) ähnlich hohe Zähigkeitswerte (165 J) wie bei den Probeschweißungen erreicht werden, sind die Hochlagenwerte für den Kreuzstoß doch deutlich geringer. Sie betragen für $T \geq 20\text{ °C}$ etwa 60 J. Ein Grund für diese große Abweichung in der Hochlage kann die bessere Wärmeableitung beim Kreuzstoß sein, so dass dadurch eine schnellere Abkühlung stattfindet und infolgedessen die Zähigkeitseigenschaften schlechter werden. Aufgrund der daraus resultierenden unterschiedlichen Kurvensteigungen im Übergangsbereich sind ausgeprägtere Abweichungen bei der T_{40J} -Temperatur zu erkennen. Für Probe DHY-N3 gilt $T_{40J} = -24\text{ °C}$ und für Probe DHY-N6 gilt $T_{40J} = -46\text{ °C}$.

Bild 3-22 zeigt zudem die Zähigkeitskurve für die Stumpfstoßprobe DHY-N7, die mit werkstüblichen Schweißparametern und einem Nahtvorbereitungswinkel von 42° (statt 50°C) geschweißt wurde. Die wesentlich besseren Zähigkeitseigenschaften treten deutlich hervor. Die Übergangstemperaturen betragen $T_{27J} = -84\text{ °C}$ und $T_{40J} = -79\text{ °C}$ und sind identisch zu denen im Vorgängerprojekt [1]. Auch hinsichtlich der Hochlagenzähigkeit weist diese Stumpfstoßprobe wesentlich bessere Zähigkeiten auf.

3.2.1.5 Bruchmechanische Rissfortschrittsversuche

Die Rissfortschrittsversuche wurden an CT-Proben nach ASTM-E-647-08 durchgeführt, siehe Bild 3-23. Die Entnahme der Rohlinge aus dem Probekörper erfolgte in Analogie zu Bild 3-10. Der Kerb der CT-Proben war wie der Kerb der Charpy-V-Probe längs der Naht orientiert und befand sich im in der WEZ der Schweißnaht.

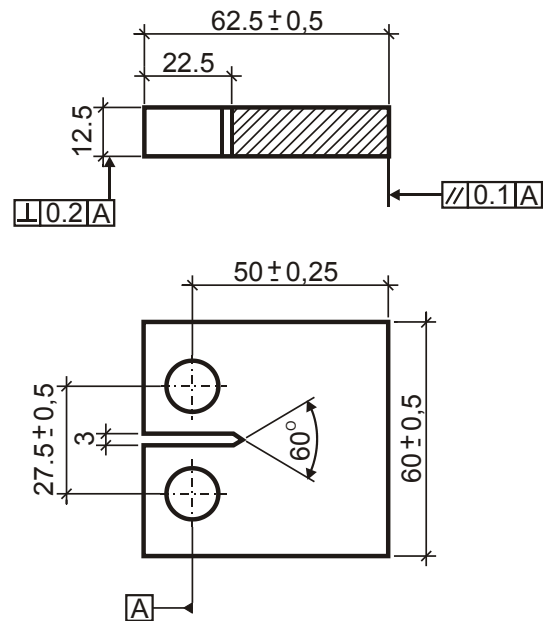
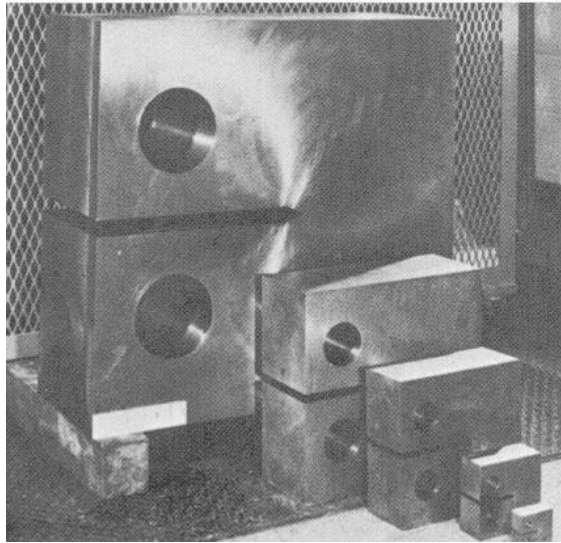


Bild 3-23 CT-Probe nach ASTM-E-647-08

Die Versuche wurden bei Raumtemperatur (ca. 20 °C) durchgeführt. Die Prüffrequenz betrug 50 Hz und das R-Verhältnis Unter- zu Oberlast konstant ca. 0,1. Die Rissgrößenmessungen wurden mit der Gleichstrom-Potential-Methode (DCP) durchgeführt.

Es wurden sowohl die Rissfortschrittsparameter C und m für die Stumpfstoßverbindungen mit DHY-Naht (DHY-N6) als auch für die Kreuzstoßverbindungen mit DHY-Naht (DHY-N3) an jeweils drei CT-Proben im Bereich eines kontrollierten Risswachstums ermittelt, um so mögliche Streuungen erfassen zu können. Die Parameter C und m wurden deswegen bestimmt, um später die experimentellen Rissfortschrittsversuche (vgl. Abschnitt 3.2.3.1) numerisch nachbilden zu können.

Für die Kreuzstöße ist die Rissfortschrittsrate da/dN über die zyklischen Spannungsintensitätsfaktoren ΔK doppellogarithmisch in den beiden Diagrammen in Bild 3-24 aufgetragen. Links sind Messergebnisse sowie die mittels linearer Regression ermittelten zugehörigen Paris-Gleichungen jeweils für die einzelnen CT-Proben (CT-1, CT-2 und CT-3) gezeigt. Die Paris-Konstanten C und m liegen in einem engen Streubereich, wobei die Steigung der Paris-Gleichung beschreibende Parameter m Werte zwischen ~ 4 und $4,5$ annimmt. Im rechten Teil von Bild 3-24 ist die Gesamtauswertung aller Messergebnisse aller CT-Proben dargestellt. Im Mittel ergeben sich für C und m die Werte nach Bild 3-26, rechts (Tabelle).

Bild 3-25 zeigt entsprechende Ergebnisse für die Rissfortschrittsuntersuchungen an der Stumpfstoßverbindung der Probe DHY-N6. Insbesondere weist hier die Probe CT-2 ein deutlich abweichendes Verhalten im Vergleich zu den beiden anderen Proben CT-1 und CT-3 auf. Die Steigung ist mit $m = 3,1700$ deutlich geringer als die beiden Steigungswerte der Proben CT-1 und CT-3, die im Bereich von $5,3$ bis $5,8$ liegen. Weiterhin sind Unterschiede beim Exponenten des C -Wertes zu erkennen. Dieser nimmt für die Proben CT-1 und CT-3 Werte von -20 und -21 an, für die Probe CT-2 den Wert -13 . Zurückzuführen ist dies auf deutlich unterschiedliche Anfangsrisslängen beim Start des Rissfortschrittsversuches an Probe CT-2. Auf einer Stirnseite der Probe wurde die Länge des Anfangsrisses zu 4 mm bestimmt, währenddessen auf der gegenüberliegenden Seite nur $0,5$ mm gemessen wurden. Nach dem Start des Rissfortschrittsversuchs wuchs der kleine Riss schlagartig auf 3 mm an.

Im folgenden Versuchsablauf unterschieden sich die Risslängen dauerhaft konstant um ca. 2 mm. Bild 3-25, links, zeigt aus diesem Grund die Auswertung aller Proben sowie die Auswertung unter Vernachlässigung der Probe CT-2.

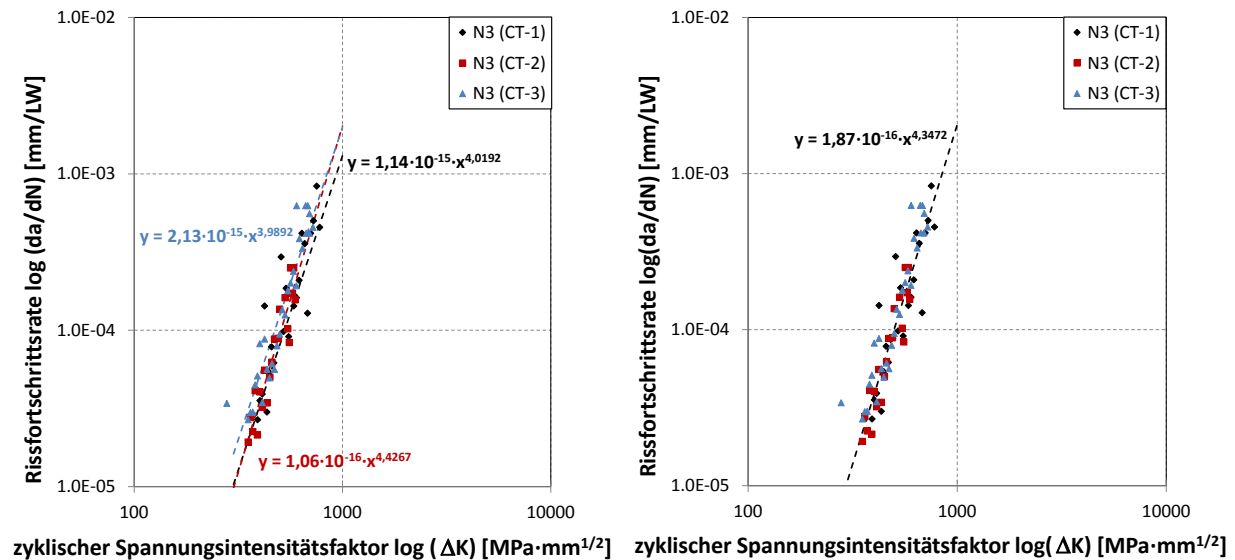


Bild 3-24 **Ergebniss der Rissfortschrittsversuche an CT-Proben für die Kreuzstoßverbindungen DHY-N3: Individuelle Auswertung der Messwerte getrennt nach CT-Proben (links) und Auswertung der Messwerte aller CT-Proben zusammen (rechts)**

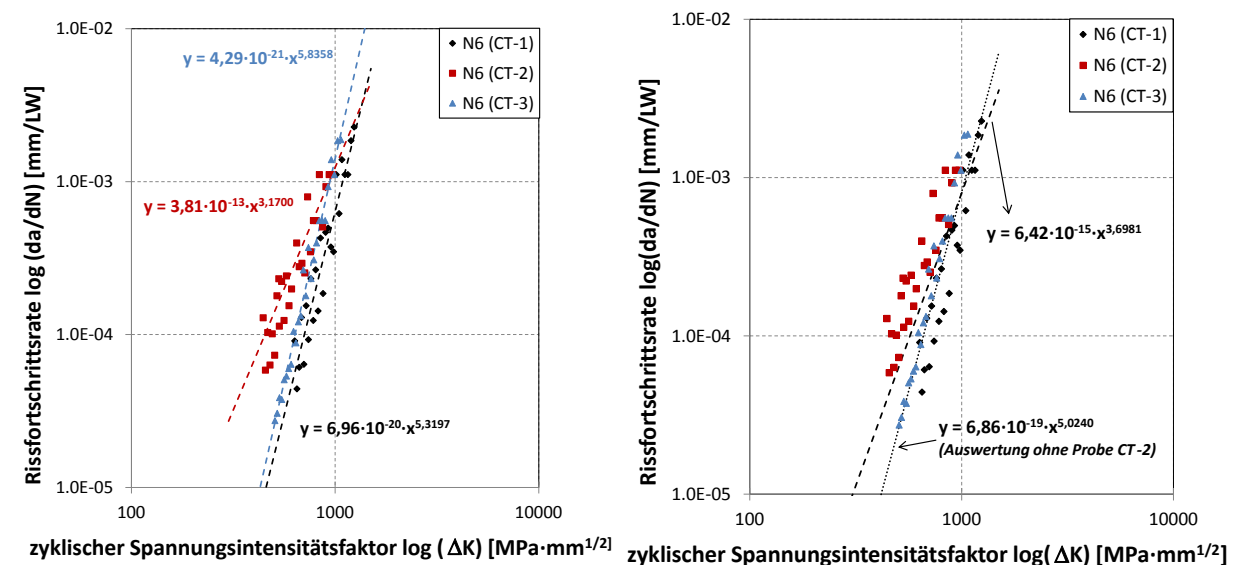


Bild 3-25 **Ergebniss der Rissfortschrittsversuche an CT-Proben für die Stumpfverbindungen DHY-N6: Individuelle Auswertung der Messwerte getrennt nach CT-Proben (links) und Auswertung der Messwerte aller CT-Proben zusammen (rechts)**

In Bild 3-26, links, sind die resultierenden Paris-Geraden für die Stumpfstoße und die Kreuzstoße in einem Diagramm und die C und m-Werte tabellarisch dargestellt. Aufgrund des un stetig erfolgenden Rissfortschritts an den Stirnseiten der Probe CT-2 am Stumpfstoß DHY-N6 werden für die nachfolgenden Simulationen die Paris-Parameter unter Ausschluss von Probe CT-2 verwendet. Insgesamt zeigten die Versuche ein eher langsames Rissfort-

schrittsverhalten, wobei die Rissfortschrittsrate bei gleichbleibender Beanspruchung an den Kreuzstoßverbindungen größer ist.

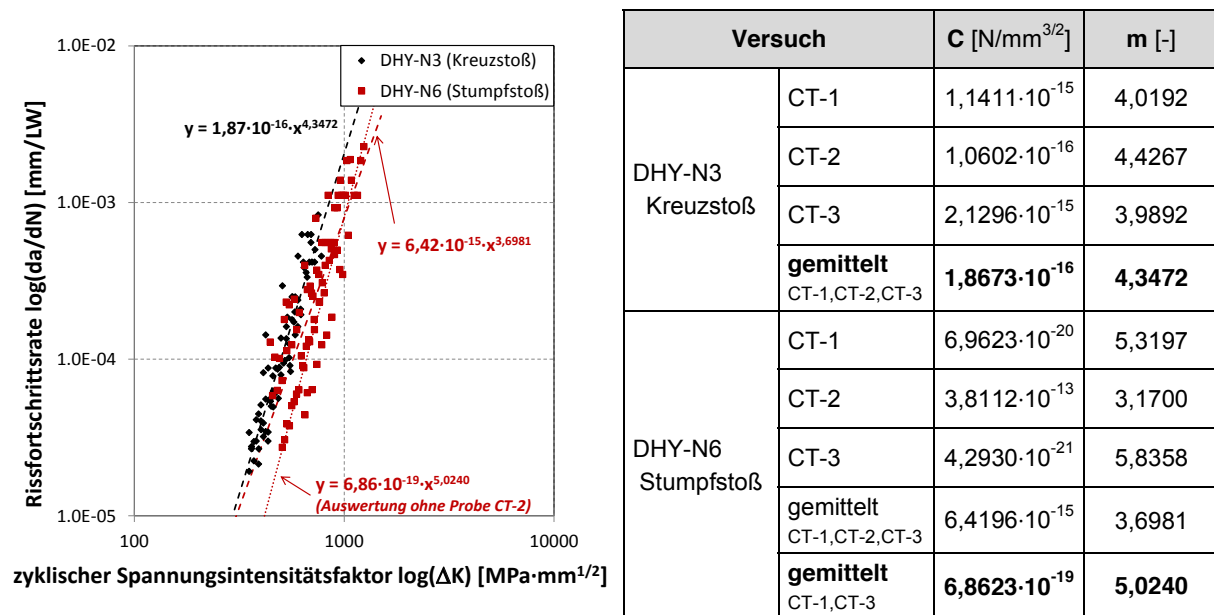


Bild 3-26 Gegenüberstellung der Rissfortschrittsparameter (links) und tabellarische Zusammenstellung der ermittelten Konstanten C und m (rechts)

Bild 3-27 zeigt den Vergleich der Rissfortschrittseigenschaften der Kreuzstoß- (DHY-N3) und Stumpfstoßverbindungen (DHY-N6) mit Empfehlungen für C und m aus der Literatur [16][18] und mit den experimentell in [1] ermittelten Rissfortschrittsparametern. Zunächst zeigt sich, dass die Empfehlungen für C und m im Hintergrundgrundbericht [16] zum Eurocode 3-1-10 als auch die Empfehlungen im IIW-Dokument [18] den Fall der vorliegenden Schweißverbindungen mit „ungünstigen“ Zähigkeitseigenschaften für $\Delta K = 1000 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ nicht mehr abdecken. Bei konstanter bruchmechanischer Beanspruchung weisen die Kreuzstoßverbindungen DHY-N3 und die Stumpfstoßverbindungen DHY-N6 größere Rissfortschrittsraten und somit schnelleres Risswachstum auf als mit den entsprechenden im Eurocode ($C = 1,8 \cdot 10^{-13}$, $m = 3,0$) bzw. im IIW-Dokument ($C = 5,21 \cdot 10^{-13}$, $m = 3,0$) genannten Werkstoffparametern.

Die in AiF 14174 [1] experimentell an HY- und DHY-Nähten von Kreuzstößen ermittelten Rissfortschrittsparameter C und m führen dahingegen zu langsamerem Risswachstum, welches durch die Eurocode- und IIW-Empfehlungen auf der sicheren Seite abgedeckt wird. Der Vergleich dieser Kreuzstoßverbindungen mit den neuen Kreuzstoß- (DHY-N3) und Stumpfstoßverbindungen (DHY-N6) hebt die sehr günstigen Zähigkeitseigenschaften der Schweißungen aus dem Vorgängerprojekt deutlich hervor.

Weiterhin zeigt sich die Güte der vorliegenden Messungen, wenn die Messergebnisse unter Berücksichtigung der üblichen Streuungen für die Verbindungen DHY-N3 und DHY-N6 in das von Gurney [31] ermittelte Streuband für normal- und hochfeste Baustahlbleche eingefügt werden. Dies ist in Bild 3-26, rechts, durch Vergleich mit der von Gurney abgeleiteten Korrelationsgeraden dargestellt. Ebenso sind in diesem Diagramm die Empfehlungen für C und m nach Eurocode-Hintergrunddokument [18] und IIW-Dokument [16] gezeigt.

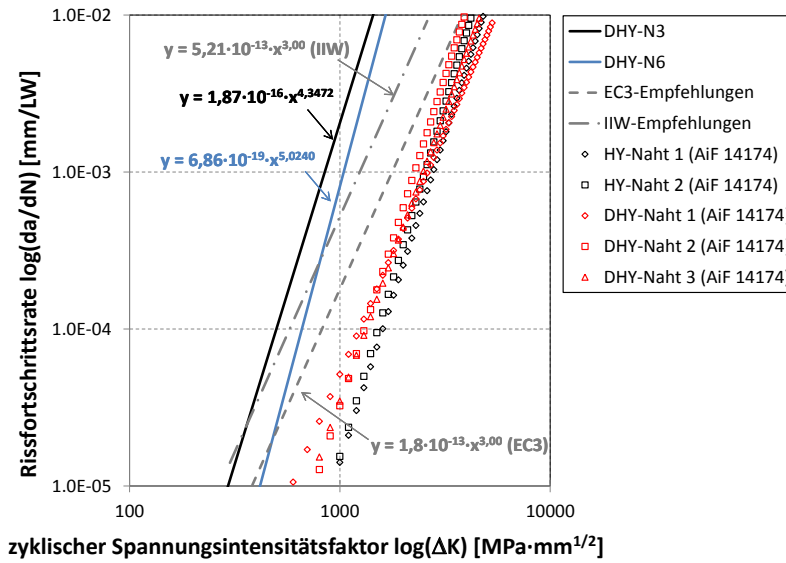


Bild 3-27 **Ergebniss der Rissfortschrittsversuche an CT-Proben im Vergleich mit den Rissfortschrittparametern aus [1] und im Vergleich zu Literaturwerten [16][18]**

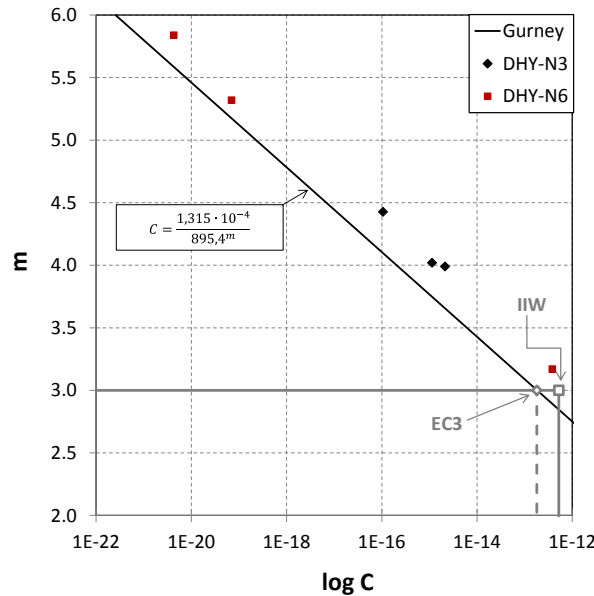


Bild 3-28 **Vergleich der Rissfortschrittsversuche mit der Korrelation nach Gurney [31]**

3.2.1.6 Härteuntersuchungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden Härtpfugung nach Vickers gemäß DIN EN ISO 6507 durchgeführt. Bei dieser Prüfung wird eine gleichseitige Diamantpyramide mit einem Öffnungswinkel von 136° mit einer Prüfkraft F in die Werkstückoberfläche eingedrückt. Die mit einem Messmikroskop festgestellte Länge der Diagonalen d des bleibenden Eindrucks dient zur Berechnung der Eindruckoberfläche, aus der in Abhängigkeit der Prüfkraft F die Härte nach Vickers HV berechnet werden kann.

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d_m^2} \tag{3-2}$$

Tabelle 3-10 zeigt die Ergebnisse der Härteprüfung nach Vickers, die sowohl im Bereich des Grundwerkstoffs als auch im Bereich der Restspalte durchgeführt wurde. Die Härtewerte des Grundwerkstoffs liegen im Bereich zwischen 105-110 HV, diejenigen in der Nähe der Restspalte zwischen 160 und 170 HV.

Tabelle 3-10 Vickers-Härte in Restspaltnähe

	Härtebestimmung nach DIN EN ISO 6507					
	DHY-N3 (Kreuzstoß)		DHY-N6 (Stumpfstoß)		DHY-N7 (Stumpfstoß)	
	GW	Restspalt	GW	Restspalt	GW	Restspalt
d₁ [mm]	0,410	0,340	0,410	0,340	0,420	0,330
d₂ [mm]	0,410	0,340	0,420	0,340	0,420	0,330
d_m [mm]	0,410	0,340	0,415	0,340	0,420	0,330
HV 10	110	160	108	160	105	170

3.2.2 Grundmaterial der Proben DHY-N1-2 – DHY-N6-2

Die Werkszeugnisse des Grundmaterials S355J2+N der Proben DHY-N1-2 bis DHY-N6-2 sind in Anhang B.2 dargestellt. Die zugehörige Chargennummer lautet 802837. Hinsichtlich der Festigkeits- und Duktilitätseigenschaften ist es mit dem zuvor verwendeten Material der Probekörper DHY-N1 bis DHY-N7 gut vergleichbar, vgl. Anhang B.2. Große Unterschiede sind bei der Betrachtung der Zähigkeitseigenschaften zu finden. Hierbei zeigt das neue Material ausgesprochen gutmütige Kerbschlagbiegewerte auf, die viermal so hoch sind wie beim Vormaterial. Da jedoch das Bauteilversagen in der Schweißnaht ausgehend von den Restspalten stattfinden soll, sind die besseren Zähigkeitskennwerte des Grundmaterials bei der Versuchsauswertung nur von vernachlässigbar geringem Einfluss.

- Streckgrenze $f_{y}(t = 40 \text{ mm}) = 382 \text{ N/mm}^2$
- Zugfestigkeit $f_u(t = 40 \text{ mm}) = 542 \text{ N/mm}^2$
- Bruchdehnung $A_5 = 25 \%$
- Kerbschlagzähigkeit $KV = 203 \text{ J}$

3.2.3 Bauteilversuche

Jeder Bauteilversuch bestand aus zwei aufeinanderfolgenden Teilversuchen, einem Rissfortschrittsversuch zur Erzeugung eines scharfen Anriss sowie einem quasi-statischen Resttragfähigkeitsversuch, der bei tiefen Temperaturen durchgeführt wurde und zu Sprödbbruch führen sollte. Alle Versuche wurden am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen durchgeführt. Der Versuchsaufbau sowie eine Skizze der Lasteinleitung am Beispiel der Kreuzstoßverbindung ist in Bild 3-29 dargestellt.

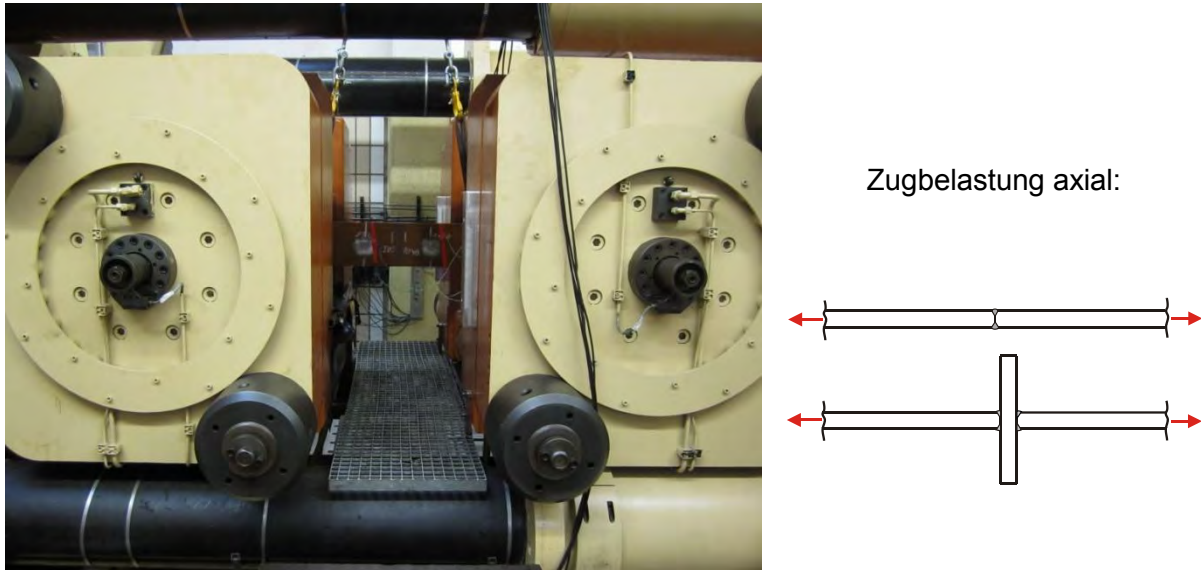


Bild 3-29 Versuchsaufbau in der Großzugmaschine am IEHK der RWTH Aachen sowie Prinzipskizze

3.2.3.1 Rissfortschrittsversuche

Im Rissfortschrittsversuch wurden die Proben im Resonanzbetrieb der Großzugmaschine mit einer Zugschwellbeanspruchung mit etwa 30 Hz belastet. Für die Spannungsschwingbreiten wurden Werte zwischen 100 MPa bis 140 MPa festgelegt. Das Verhältnis der Mittelspannung zur Streckgrenze betrug in etwa 0,5 bei Spannungsverhältnissen $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ von 0,4~0,5.

Zur Erzeugung eines scharfen Anfangsrestspaltes wurde zu Versuchsbeginn für eine definierte Anzahl von Schwingspielen eine um ca. 35 % erhöhte Spannungsschwingbreite bei einer höheren Oberspannung verwendet. Damit sollten definierte Anfangsbedingungen für das Ermüdungsrisswachstum erzeugt werden. Während dieser ersten Ermüdungslaststufe wurde der Rissfortschritt an den Stirnseiten der Proben beobachtet. Sobald auf beiden Seiten ausgeprägte Anrisse zu erkennen waren, wurden die Ermüdungslasten zurückgenommen. Für diese Anrissphase wurden Ermüdungsschwingspiele von 30.000 bis 140.000 aufgebracht.

Die aufgebrachten Lasten und Lastspielzahlen wurden für die spätere Nachrechnung aufgezeichnet. Während der Rissfortschrittsversuche sollten durch zeitweises Absenken der Oberlasten Rastlinien auf der Bruchfläche erzeugt werden, die zusammen mit den notierten Lastwechselzahlen Aufschluss über das Rissfortschrittsverhalten der Bauteilproben geben sollten. Die Daten der Rissfortschrittsversuche sind ausführlich in Anhang B.4 dargestellt. Die Rissfortschrittsversuche wurden gestoppt, sobald sich an den Stirnseiten aus den Anfangsrestspalten Ermüdungsrisse gebildet hatten, so dass in etwa die halbe Schweißnaht gerissen war. Dies war in Abhängigkeit der Probe bei Lastspielzahlen zwischen 143.000 und 610.000 Lastwechseln erreicht. Im Laufe der Versuchsdurchführung wurde später auch noch sehr viel weiter geschwungen, bis teilweise die Stirnseite einen kompletten Durchriss aufwies. Grund hierfür war, dass sich die Anrisse nicht gleichmäßig über die Probenbreite ausbreiteten und sich nur auf die Stirnseiten der Proben konzentrierten. Aus diesem Grund versagten die ersten Proben auch nicht spröde, siehe dazu Abschnitt 3.3.

3.2.3.2 Quasistatische Zugversuche bei tiefer Temperatur

Um sprödes Versagen sicher zu stellen, wurde der geschweißte Bereich auf Temperaturen heruntergekühlt, bei denen Tieflagenzähigkeiten vorliegen. Diese Prüftemperaturen wurden zunächst gemäß Kerbschlagarbeits-Übergangskurve aus Bild 3-22 zu $\sim -100\text{ °C}$ festgelegt. Teilweise wurden die Probekörper später auch wesentlich tiefer abgekühlt (-155 °C).

Jede Bauteilprobe wurde auf beiden Seiten mit Thermoelementen und zwei Kühlelementen bestückt. Als Kühlmittel wurde Stickstoff verwendet. Die Probentemperatur konnte unter laufender Stickstoffzufuhr in der Thermobox in Bild 3-30 nahezu konstant gehalten werden.

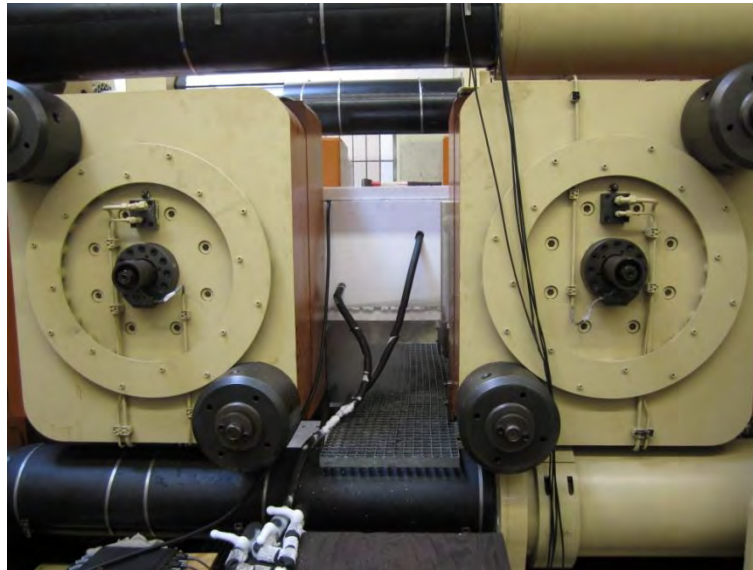


Bild 3-30 Versuchsaufbau in der Großzugmaschine am IEHK der RWTH Aachen

Die Proben waren während des Zugversuches mit Dehnungsmessstreifen (DMS) gemäß Bild 3-31 bestückt. Die Versuche wurden quasi-statisch mit einer Kolbenkeschwindigkeit von 2 mm/min durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anhang B.4 dokumentiert.

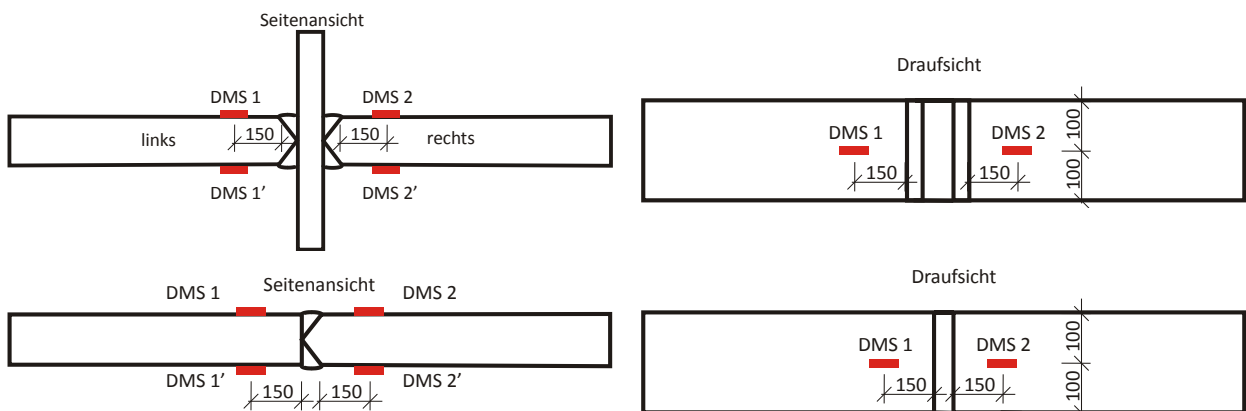


Bild 3-31 Positionen der DMS beim Kreuzstoß (oben) und beim Stumpfstoß (unten)

3.3 Versuchsergebnisse

3.3.1 Kreuzstoßverbindungen DHY-N1 und DHY-N2

Es war nicht möglich einen über die Bauteilprobe gleichmäßigen Ermüdungsanriss aus den Restspalten zu erzeugen. Die gewünschte Ermüdungsrissergröße entsprechend der halben Blechdicke konnte nur an den Stirnseiten der Probe erzeugt werden. Exemplarisch ist dies Bild B-23 bzw. Bild B-31 in Anhang B.4 zu entnehmen. Der Bruch erfolgte dementsprechend im Zugversuch bei niedrigeren Temperaturen nicht spröde, sondern zäh. Die Bruchlasten lagen bei der Probe DHY-N1 bei 3443 kN und bei der Probe DHY-N2 bei 3647 kN. Dies entspricht einer Bruchspannung von 425 MPa bzw. 450 MPa.

3.3.2 Stumpfstoßverbindungen DHY-N4 und DHY-N5

Bei der Stumpfstoßprobe DHY-N4 wurde dasselbe Phänomen wie in Abschnitt 3.3.1 beobachtet. Auch hier versagte die Verbindung zäh, da sich keine Ermüdungsanrisse über die Probe ausgebreitet haben, vgl. Bild B-40. Die Bruchkraft lag bei 3897 kN, was einer Bruchspannung von ca. 475 MPa entspricht.

Aufgrund der vorherigen Ergebnisse wurde bei der Probe DHY-N5 der Risswachstumsversuch länger gefahren, so dass auf einer Stirnseite fast die gesamte Schweißnaht gerissen war. Beim anschließenden Zugversuch bei tiefen Temperaturen begann die Probe zunächst geringfügig zu fließen, jedoch relativ schnell gefolgt von Spröbruch. Aus den Restspalten haben sich über die Bauteilbreite Ermüdungsanrisse gemäß Bild B-47 entwickelt, die an den Stirnseiten jedoch deutlich ausgeprägter sind. Bruchversagen wurde hier bei einer Kraft von 2808 kN bzw. bei einer Bruchspannung 345 MPa erreicht.

3.3.3 Diskussion der vorläufigen Ergebnisse

Als mögliche Ursache der ausschließlich bzw. nur vorwiegend an den Stirnseiten festgestellten Ermüdungsrissswachstums der Probekörper kann nur der Schweißeigenspannungszustand herangezogen werden, der für eine höhere Beanspruchung an den Rändern im Vergleich zum Probeninneren geführt haben könnte. Im Vorgängerprojekt AIF 14174 [1] wurden dieselben Erscheinungen bei DHY-Kreuzstoßverbindungen festgestellt. Dort konnten gleichmäßig über die Bauteilbreite fortgeschrittene Ermüdungsrisse nur nach zusätzlichen Spannungsarmglühen erzeugt werden. Dabei wird der Eigenspannungszustand ohne merkliche Änderung der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften der Schweißverbindung aufgehoben.

Die Fa. Züblin hat aus diesem Grund außerplanmäßig weitere Versuchskörper (DHY-N1-2, DHY-N2-2, DHY-N4-2, DHY-N5-2) zur Verfügung gestellt, die im Vorfeld der Untersuchungen bei ca. 560-580 °C für drei Stunden spannungsarmgeglüht wurden. Die Probekörper wurden dabei spätestens ab einer Ofentemperatur von 300 °C in den Glühofen geschoben und dann mit max. 100 °C pro Stunde auf Spannungsarmglühtemperatur aufgeheizt. Die Abkühlung erfolgte bis 300 °C im Ofen mit Abkühlraten von max. 100 °C und danach an Luft.

3.3.4 Kreuzstoßverbindungen DHY-N1-2 und DHY-N2-2

Die Kreuzstoßprobe DHY-N1-2 wies zunächst nach 284500 Schwingspielen nur auf einer Stirnseite einen sichtbaren Anriss mit einer Länge von etwa 20 mm auf (halbe Zugblechdicke). Auf der gegenüberliegenden Stirnseite konnte kein Risswachstum festgestellt werden, siehe Anhang B.4, Bild B-24. Durch Auffräsen der Bruchflächen wurde das Schweißgut abgetragen bis der ursprüngliche Restspalt sichtbar wurde. Es stellte sich dann heraus, dass das Risswachstum sich abschließend auf eine Stirnseite konzentriert hatte. Über die weitere Probenbreite war bis zu der gegenüberliegenden Stirnseite kein Anzeichen von Risseinleitung und somit auch kein Risswachstum erkennbar, siehe Bild B-28. Des Weiteren war ein Oberflächenriss mit einem Ausmaß von etwa 25 mm am Schweißnahtübergang in das Grundmaterial des Zugbleches an einer Stirnseite zu erkennen. Er konnte aufgrund der schlechten Lichtverhältnisse nicht in ausreichender Qualität fotografisch dokumentiert werden.

Der Zugversuch wurde bei -135 °C durchgeführt und die Probe versagte spröde bei einer Bruchlast von 2477 kN. Dies entspricht einer Bruttospannung von etwa 303 MPa. Auffällig war, dass der Spröbruch zwar von der einen Stirnseite von den Restspalten ausging, jedoch dann nicht mehr entlang der Spalte in das Bauteil hinein, sondern quer durch das Schweißgut lief, vgl. Bild B-27. Der zuvor erwähnte Oberflächenanriss am Schweißnahtübergang zum Grundmaterial des Zugbleches spielte beim Versagen keine Rolle.

Obwohl die Probe spannungsarmgeglüht wurde, lies das anfängliche Bruchbild erahnen, dass die eingeschwungenen Anrisse immer noch stirnseitig konzentriert waren und nicht gleichmäßig im Bauteilinneren vorhanden waren. Aus diesem Grund wurden die verbleibende Kreuzstoß- sowie die beiden restlichen Stumpfstoßproben etwas länger mit einer Schwingbeanspruchung belegt. Über die in der Probenmitte angeordneten Dehnungsmessstreifen wurden die Belastungszyklen solange weiter vorangetrieben, bis die DMS-Signale Hinweise in Form von Steifigkeitsveränderungen an den Restspalten in der Probenmitte anzeigten. Dies ging in etwa mit einer vollständig gerissenen Stirnseite einher.

Bei der Kreuzstoßprobe DHY-N2-2 wurden 316000 Lastzyklen gefahren. Die Probe versagte bei einer etwas tieferen Temperatur von -130 °C bei 1766 kN. Dies entspricht einer Bruttospannung von etwa 210 MPa. Auch hier ging der Riss zunächst von den Restspalten an den Rändern aus, änderte dann aber seine Richtung schräg durch das Schweißgut. Das Bruchbild der aufgefästen Probe in Bild B-36 zeigt auch hier, dass Rissentwicklung aus den Restspalten heraus in der Bauteilmitte nicht stattgefunden hat.. Auch hier scheint die Prozedur des Spannungsarmglühens nicht ausreichend, um den eingepprägten Schweißeigenspannungszustand in der Probe aufzulösen, so dass über die Probenbreite gleichmäßig verlaufender Rissfortschritt einstellbar ist. Auch diese Probe wies einen Oberflächenriss am Schweißnahtübergang auf, der jedoch nicht an der Bruchform beteiligt war.

3.3.5 Stumpfstoßverbindungen DHY-N4-2 und DHY-N6-2

Beim Stumpfstoß DHY-N4-2 wurden 227000 Lastwechsel aufgebracht, so dass an einer Stirnseite ein vollständiger Durchriss erzeugt wurde, siehe Bild B-43. Auf der gegenüberliegenden Stirnseite fiel der eingeschwungene Restspalt wesentlich kleiner aus. Die Ultraschalluntersuchungen zeigten bereits, dass der Restspalt tendenziell über die Schweißnaht-

breite kleiner wird, vgl. Anhang E.1. Die Probe wurde konservativ bis -155 °C heruntergekühlt. Bei einer Bruchlast von 1346 kN (165 MPa) versagte sie spröde ausgehend von den Restspalten und auch entlang der Restspalte, nicht wie bei den Kreuzstoßproben durch das Schweißgut. Die Bruchflächenanalyse im Anschluss zeigt hierbei auch in Probenmitte deutlichen Rissfortschritt, siehe Bild B-43, wobei der Rissfortschritt an den Stirnseiten dennoch viel ausgeprägter ist. Des Weiteren zeigen die Bruchflächen auch Bereiche, in denen gar kein Rissfortschritt ausgehend von den Restspalten festzustellen war, z.B. im direkten an die Stirnseite anschließenden Probenbereich rechts unten in Bild B-43. Letztendlich führte eine ausgeprägte, wenn auch immer noch unregelmäßig ausgebildete, scharfe Anrissfront in Verbindung mit den sehr tiefen Temperaturen zum gewünschten Sprödbbruch bei relativ geringer Last.

Das Ergebnis bei der Bauteilprobe DHY-N6-2 ist ähnlich. Auch hier wurde bei -135 °C Sprödbbruch ausgehend von den Spalten beobachtet. Die Bruchlast betrug 2390 kN bzw. die Bruttoversagensspannung 295 MPa. Die für das Versagen im Vergleich zu der Probe DHY-N4-2 größeren notwendigen Kräfte sind auf die höheren Temperaturen und auf die weniger fortgeschrittene scharfe Anrissfront zurückzuführen. Der Anriss wurde aus den Restspalten mit 330000 Lastzyklen erzeugt und konzentrierte sich auf eine Stirnseite und nimmt dann sukzessive über die Probenbreite auf die ursprüngliche Restspaltgröße ab, siehe Bild B-49.

3.3.6 Zusammenfassung

Tabelle 3-11 stellt die maßgeblichen Versuchssaten und die Versuchsergebnisse dar. Die gemessene gemittelte Restspaltlänge zum Zeitpunkt des Resttragfähigkeitsversuchs ist mit $2a_{\text{mittel}}$, die maximale Restspaltgröße mit $2a_{\text{max}}$ gekennzeichnet. Die entsprechenden Festigkeitskennwerte bei Raumtemperatur $f_y(\text{RT})$ und die Zähigkeitskennwerte T_{27J} wurden aus Abschnitt 3.2.1 übernommen. Die Versagenstemperatur während der Sprödburchversuche ist T_{Exp} , die Kolbenkraft beim Versagen ist die Bruchlast F_{Exp} .

Tabelle 3-11 Ergebnisse der Bauteilversuche unter tiefen Temperaturen

Versuch	t [mm]	B [mm]	$2a_{\text{mittel}}$ [mm]	$2a_{\text{max}}$ [mm]	$f_y(\text{RT})$ [MPa]	T_{27J} [°C]	F_{Exp} [kN]	T_{Exp} [°C]	Versagensform
DHY-N1	40,4	199,9	*)		393	-48,5	3443	-106	zäh
DHY-N1-2	40,2	203,5			393	-48,5	2477	-135	spröde ¹⁾
DHY-N2	40,5	200,6	*)		393	-48,5	3647	-86	zäh
DHY-N2-2	40,2	202,0			393	-48,5	1796	-130	spröde ¹⁾
DHY-N4	40,5	201,5	*)		385	-53,4	3897	-111	zäh
DHY-N4-2	40,0	203,6			385	-53,4	1346	-155	spröde
DHY-N5	40,4	201,3	17,3	36,0	385	-53,4	2808	-106	spröde - zäh
DHY-N6-2	40,0	203,0			385	-53,4	2390	-135	spröde

*) Ermüdungsrisswachstum vorwiegend an den Stirnflächen

¹⁾ Proben versagten spröde, zunächst von den Stirnseiten an den Restspalten beginnend, jedoch dann abweichend von den Restspalten durch das ungestörte Schweißgut

4 Bruchmechanische Untersuchungen an Stumpfstoßverbindungen

Für Stumpfstoßverbindungen wurden mit Hilfe bruchmechanischer Methoden Spannungintensitätsfaktoren als Eingangswerte zur Ableitung zulässiger Restspaltlängen ermittelt. Dazu wurden Schweißanschlüsse mit DHY- und HY-Nähten im Rahmen einer Bachelorarbeit [29] am Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau untersucht. Im bruchmechanischen Sicherheitskonzept werden die Restspalte an den Stellen ungenügender Durchschweißung als Risse im Bauteil interpretiert.

Es wurden zwei Fertigungsvarianten untersucht:

- Herstellung der Stumpfstoßverbindung als symmetrische Schweißverbindung mit DHY-Naht (Innenriss) und
- antimetrische Schweißverbindung mit HY-Naht (Randriss).

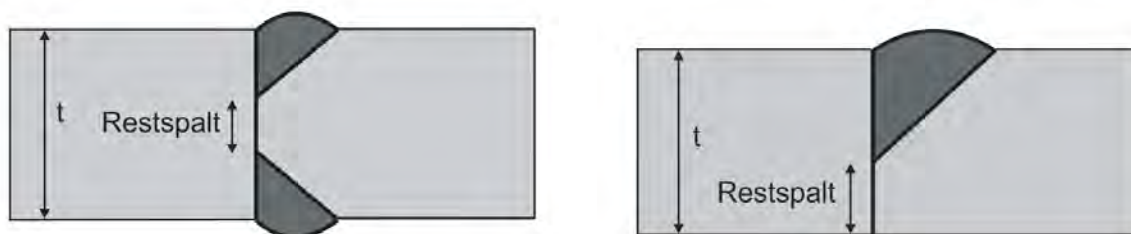


Bild 4-1 DHY-Naht mit Innenriss (links); HY-Naht mit Randriss (rechts)

Zudem wurde das Versagensverhalten durch weitere, parallel zum Restspalt auftretende Defekte berücksichtigt. Hierzu wurde der dem Spröbruchkonzept zugrunde liegende semielliptische Oberflächenriss mit einer Anfangsrisgröße von a_0 und konstantem Rissgrößenverhältnis $a/c = 0,4$ am Schweißnahtübergang der Stumpfstoßverbindung gemäß Bild 4-2 untersucht. Die Rissgröße a_0 wurde analog zu [2] bestimmt:

$$a_0 = \frac{1}{2} \cdot \ln(1+t) \quad \text{für } t < 15 \text{ mm} \quad (4-1)$$

$$a_0 = \frac{1}{2} \cdot \ln(t) \quad \text{für } t \geq 15 \text{ mm}$$

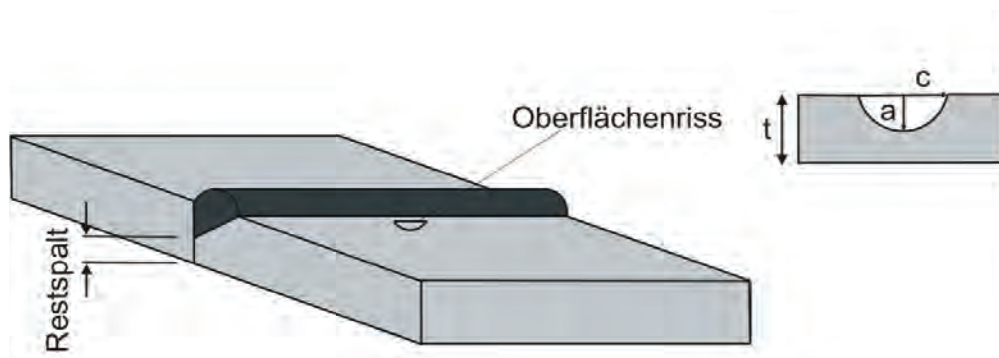


Bild 4-2 Halbelliptischer Oberflächenriss

Die Spannungsintensitätsfaktoren wurden sowohl numerisch mit dem BE-Programm BEASY als auch mit Handrechenformeln ermittelt. Da die zu untersuchenden Bleche einer reinen Zugbeanspruchung unterliegen, wurde nur der Normalspannungsmodus (Modus I) betrachtet, K_{eff} wurde hier nicht maßgeblich.

Zunächst wurde eine Reihe von Voruntersuchungen (Einfluss der Elementnetzgröße, Kerbschärfe des Schweißnahtübergangs, Einfluss der Bauteilbreite) an einem Referenzmodell sowohl für die DHY- als auch für die HY-Naht durchgeführt. Im Anschluss daran wurden die numerisch ermittelten Ergebnisse mit Handrechenformeln aus der Literatur verglichen. Mit den aus der Voruntersuchung bestimmten Ergebnissen erfolgte anschließend die Parameterstudie unter Variation der Blechdicke t .

4.1 Grundlagen zur numerischen Bestimmung von Spannungsintensitätsfaktoren

4.1.1 Boundary-Element-Methode (BEM)

Bei komplexen Geometrien müssen zur Bestimmung von Spannungsintensitätsfaktoren numerische Berechnungsverfahren angewandt werden. Ähnlich wie bei der FE-Methode wird bei der BE-Methode die Form eines Körpers ebenso netzartig durch Elemente idealisiert. Der wesentliche Vorteil gegenüber der FEM ist jedoch, dass bei der BEM für ein 3D-Modell nur die Oberfläche bzw. für ein 2D-Modell nur die Ränder diskretisiert werden müssen. Hierbei werden Ränder durch eine Knotenschnur und die Oberfläche durch ein Elementnetz abgebildet. Dadurch wird das räumliche Problem um eine Dimension reduziert, sodass der Rechenaufwand erheblich geringer ausfällt, insbesondere wenn infolge eines wachsenden Rissses eine stetige Geometrieänderung erforderlich ist.

4.1.2 BE-Software BEASY

Das Software Paket BEASY [28] verwendet Randelemente und behandelt sowohl ebene als auch räumliche Probleme mit linear-elastischen Materialgesetzen. Das Programm kann insbesondere für Korrosionsberechnungen, Ermüdungs- und Rissfortschrittsuntersuchungen sowie für mechanische und akustische Problemstellungen genutzt werden. In BEASY wird zwischen zwei Programmteilen unterschieden: BEASY-IMS (Interactive Modelling System) und BEASY Analysis Program.

Im Rahmen dieser Untersuchungen mussten geometrische Parameterstudien durchgeführt werden. Die Anwendbarkeit BEASYS hinsichtlich eines parametrisierbaren Eingabecodes ist bislang nicht gegeben, so dass auf folgende Prozedur ausgewichen werden musste.

- Erzeugung eines parametrisierbaren FE-Modells (ohne Riss) mit dem Programmsystem ANSYS 12.0
- FE-Analyse des ANSYS-Modells
- Transformation der FE-Ergebnisse in einen BEASY-Datensatz
- BE-Analyse des so erzeugten, rissfreien BEASY-Modells
- Implementieren eines Risses in das BE-Modell

- Automatisierte Rissfortschrittsanalyse

Für die 3D-Modelle wurde eine manuelle Rissfortschrittsanalyse mit dem Programmmodul BEASY-IMS durchgeführt, da für dreidimensionale Strukturen die automatisierte Rissfortschrittsanalyse zu rechen- und zeitintensiv war. BEASY verwendet hier ausschließlich Elemente mit konstanten Seitenlängen, die bei größeren Bauteilabmessungen und gleichzeitig relativ kleinen Rissen (hier $a = 0,5 \text{ mm}$) zu einer unhandlich großen Anzahl an Elementen führt. Somit wurden die Restspalte manuell über die graphische Oberfläche (BEASY-IMS) initiiert und manuell vergrößert. Dabei musste die Vernetzung des Risses ständig neu generiert werden, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu garantieren. Für eine genauere Erläuterung wird auf Abschnitt 4.2.5 verwiesen

4.1.3 BE-Modellierung

Die in Bild 4-3 bis Bild 4-6 dargestellten Modelle wurden zunächst mit Hilfe des FE-Programmes ANSYS erstellt. Mittels einer internen Routine wurden die FE-Modelle in BEASY übernommen. Hierbei wurde die Elementnetzgenerierung um eine Dimension reduziert, vgl. 4.1.2. Bei räumlichen Problemen wird die Oberfläche, bei ebenen Problemen werden die Ränder diskretisiert. Elementgröße, Materialeigenschaften sowie Geometrie- und Randbedingungen wurden von BEASY automatisiert übernommen.

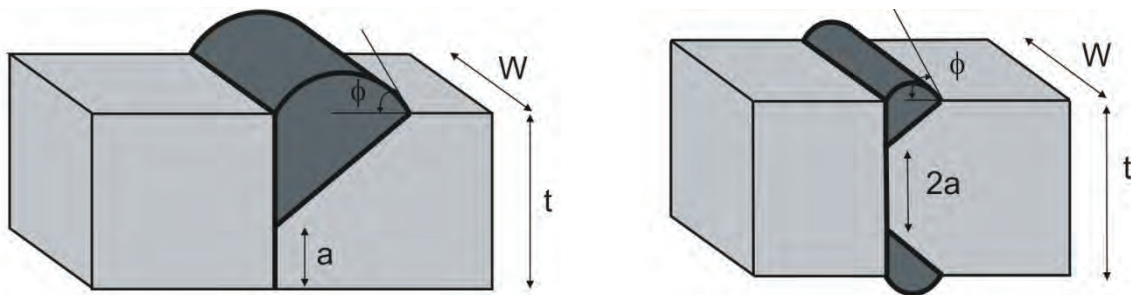


Bild 4-3 Geometrie von Stumpfstoßen; links: HY-Naht; rechts: DHY-Naht

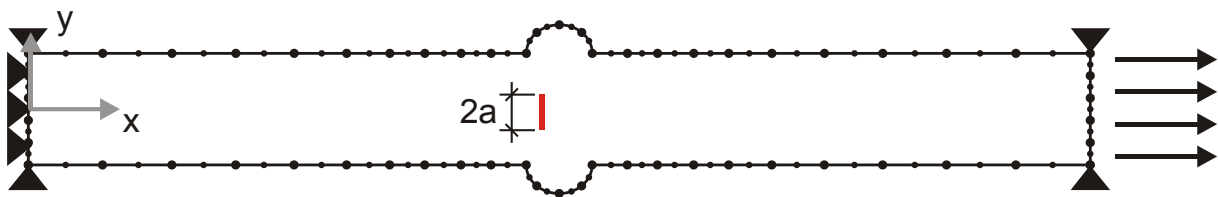


Bild 4-4 BE-Modell für Stumpfstoß mit DHY-Naht

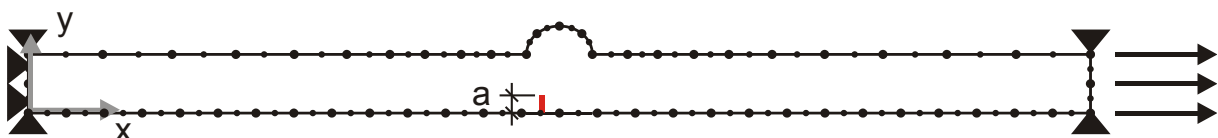


Bild 4-5 BE-Modell für Stumpfstoß mit HY-Naht

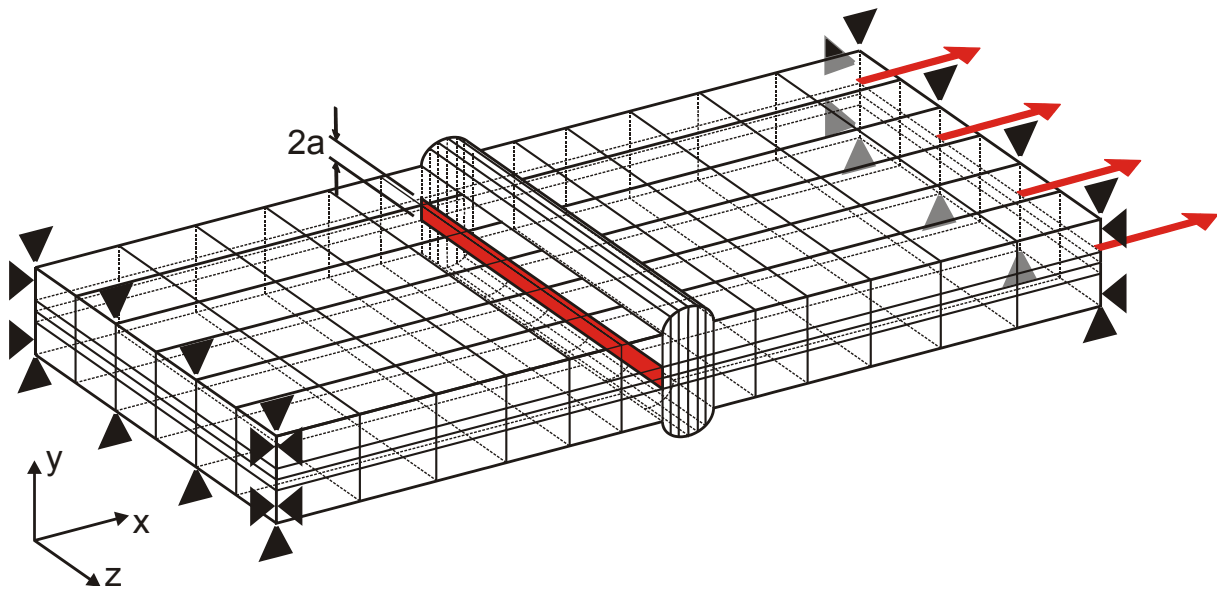


Bild 4-6 3D-Modellierung beispielhaft für die DHY-Naht

In Bild 4-4 bis Bild 4-6 sind die Randbedingungen dargestellt. Die Modelle wurden mit einer Zugspannung von $\Delta\sigma = 1 \text{ N/mm}^2$ belastet. Eine Seite wurde in allen Richtungen gehalten und die andere durch vertikale Punktlager (zweidimensional) bzw. durch vertikale und horizontale Linienlager (dreidimensional) festgehalten. Da in BEASY Risse nicht in Symmetrieachsen liegen dürfen, konnten Symmetriebedingungen nicht genutzt werden.

4.2 Numerische Voruntersuchungen

4.2.1 Allgemeines

Die Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren erfolgte im ersten Schritt numerisch sowohl für 2D- als auch für 3D-Modelle. Die Dauer der Berechnung für zweidimensionale Strukturen ist deutlich geringer, sodass vorab alle Berechnungen für zweidimensionale Modelle durchgeführt wurden. Dabei wurde zunächst der Einfluss der Elementvernetzung untersucht, indem die Modelle mit unterschiedlichen Elementgrößen diskretisiert und die daraus ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren verglichen wurden (Konvergenzuntersuchung), s. Abschnitt 4.2.3. Ebenso wurde die Schweißnahtüberhöhung für zweidimensionale Modelle untersucht. Es wurden verschiedene Modelle mit unterschiedlichem Tangentenwinkel der Schweißnahtüberhöhung erstellt und die daraus ermittelten K-Faktoren verglichen, s. Abschnitt 4.2.4. Der Einfluss der Bauteilbreite W wurde an 3D-Modellen untersucht, s. Abschnitt 4.2.5. Im Anschluss daran wurden zusätzlich Handrechenformeln aus der Literatur herangezogen. Anschließend erfolgte eine Parameterstudie bei Variation der Blechbreite t .

4.2.2 Referenzmodell

Bevor die Parameterstudie durchgeführt werden konnte, musste anhand eines Referenzmodells die Genauigkeit der aus BEASY erzielten Ergebnisse geprüft werden. In Bild 4-7 sind die Referenzmodelle für die DHY- und HY-Nahtverbindung dargestellt, an denen die Voruntersuchungen durchgeführt wurden.

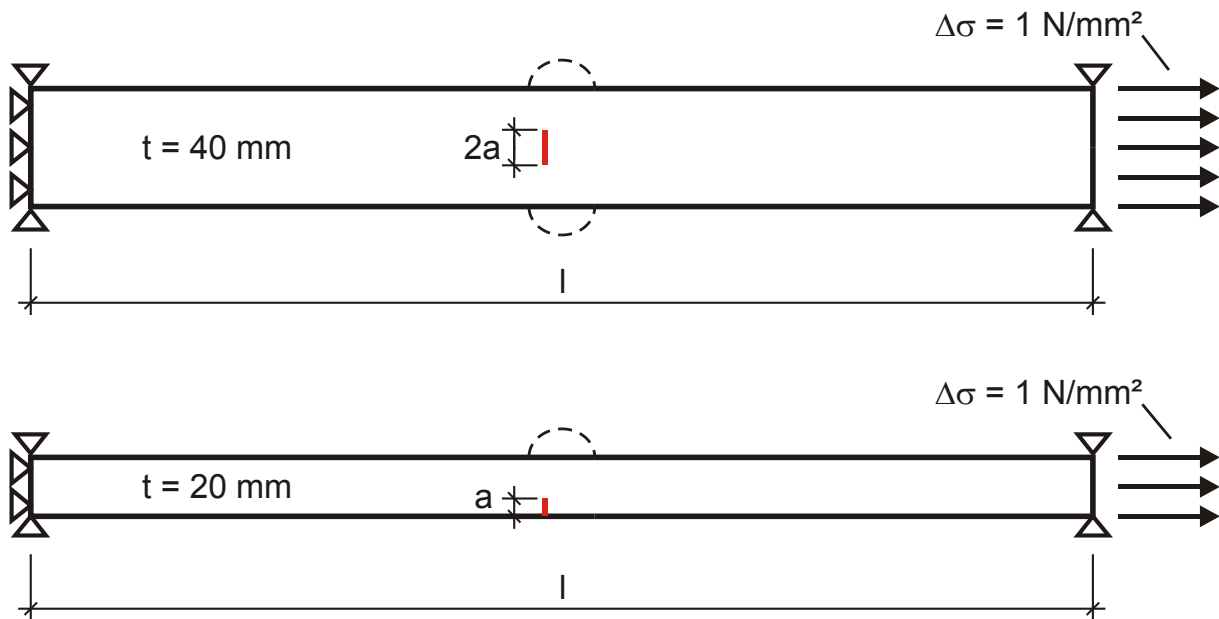


Bild 4-7 Referenzmodell DHY- und HY-Naht

4.2.3 Konvergenzuntersuchungen

Der Einfluss der Elementgröße bzw. der Vernetzungsdichte wurde beispielhaft am Referenzmodell für die DHY-Naht untersucht. Die Nahtüberhöhung wurde hier mit $\phi = 0^\circ$ gewählt. Dies entspricht einer plangeschliffenen Naht. Es wurden Rissfortschrittsuntersuchungen für verschiedene Elementgrößen durchgeführt. Da für die bruchmechanische Berechnung hauptsächlich die Elementierungsdichte im Rissbereich maßgeblich ist, wurde demzufolge das Randelementnetz in der Mitte (Bereich A) feiner diskretisiert als an den Modellrändern, vgl. Bild 4-8, an denen die Elementgröße konstant blieb.

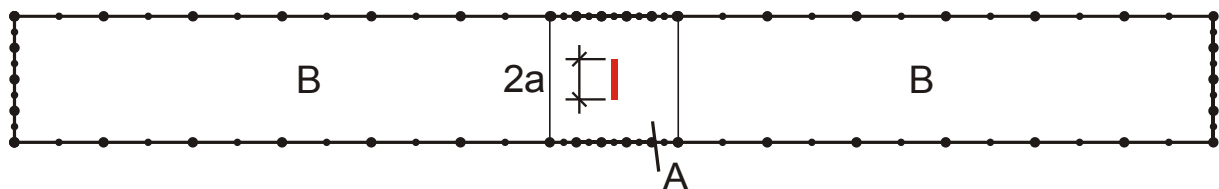


Bild 4-8 Darstellung der Elementvernetzung

Die Elementgröße wurde in Abhängigkeit der Bauteildicke t variiert, s. Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1 Variation der Elementgröße im mittleren Bereich A

DHY-Naht	t [mm]	Elementgröße (Bereich A) [mm]
Modell 1	40	$t/4$ (= 10 mm)
Modell 2	40	$t/10$ (= 4 mm)
Modell 3	40	$t/20$ (= 2 mm)

Mit Hilfe von BEASY wurde ein Riss mit einer Anfangsrissgröße $a_0 = 0,5$ mm initiiert und eine Rissfortschrittsberechnung durchgeführt. Die erforderlichen Werkstoffparameter C und m wurden mit $C = 1,8 \cdot 10^{-13}$ und $m = 3$ gemäß [16] gewählt. In Bild 4-9 sind die K -Werte für verschiedene Elementgrößen in Abhängigkeit der halben Restspaltlänge a dargestellt.

Es sind nur marginal geringfügige Unterschiede zwischen einer sehr feinen und einer eher groben Elementnetzdicke festzustellen. Mit Boundary-Elementen sind demnach sehr genaue Ergebnisse mit relativ grober Elementvernetzung im Vergleich zur Finite-Element-Berechnung erzielt werden können.

Für die weiteren Berechnungen wurde die Elementgröße $t/4$ gewählt, die zu sehr genauen Ergebnissen und einer sich auf die Rechenzeit günstig auswirkende Elementvernetzung führte.

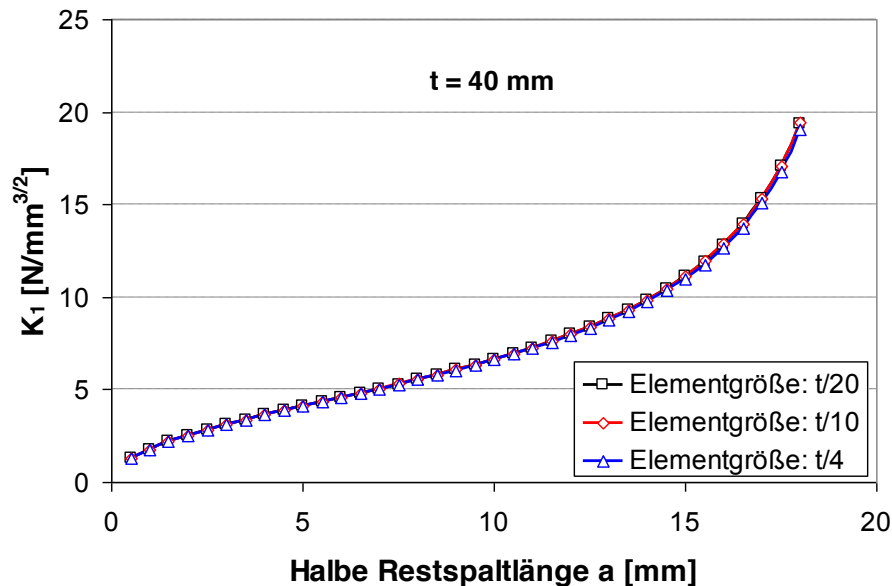


Bild 4-9 Vergleich der K-Werte für verschiedene Elementvernetzungen

4.2.4 Einfluss der qualitativen Nahtausführung

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde geprüft, inwiefern die qualitative Ausführung in Form der Schweißnahtüberhöhung einen Einfluss auf die Spannungsverteilung und somit auf die Spannungsintensitätsfaktoren hat. Für die DHY-Nahtverbindung wurden fünf Modelle mit jeweils unterschiedlichem Tangentenwinkel ϕ , vgl. Bild 4-10, erstellt ($\phi = 0^\circ$; $\phi = 10^\circ$; $\phi = 50^\circ$; $\phi = 80^\circ$; $\phi = 90^\circ$), sh. Tabelle 4-2.

Bei Betrachtung der HY-Nahtverbindung wurde der Einfluss der Schweißnahtüberhöhung für $\phi = 0^\circ$, $\phi = 20^\circ$ und $\phi = 80^\circ$ untersucht, sh. Bild 4-11.

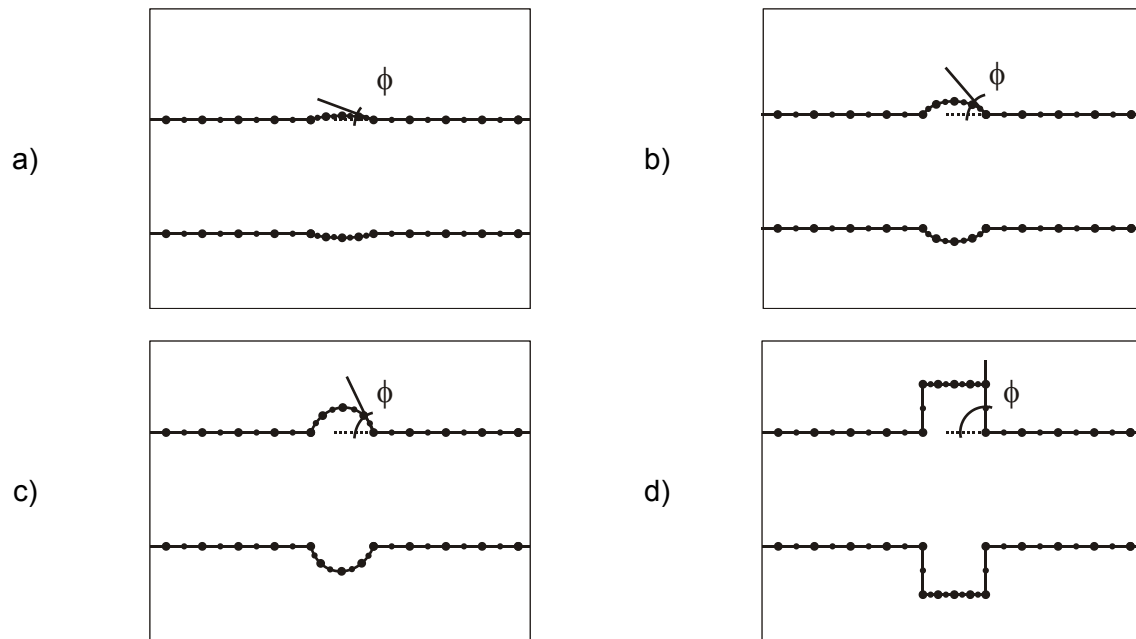


Bild 4-10 Ausschnitt BE-Modelle DHY-Naht: a) $\phi = 10^\circ$; b) $\phi = 50^\circ$; c) $\phi = 80^\circ$; d) $\phi = 90^\circ$

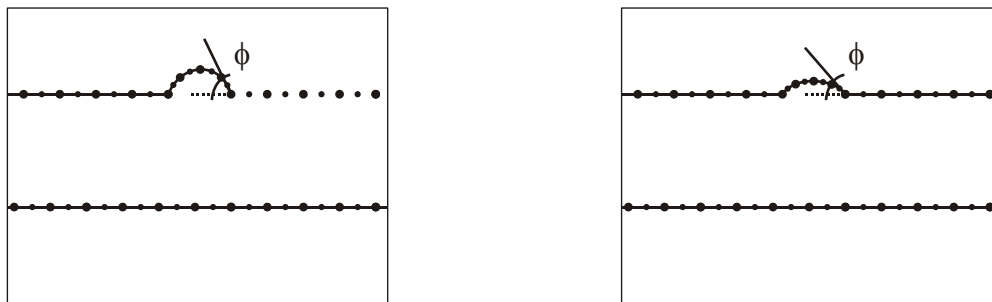


Bild 4-11 Ausschnitt BE-Modell HY-Naht für $\phi = 80^\circ$ (links) und $\phi = 20^\circ$ (rechts)

Tabelle 4-2 Variation des Winkels ϕ

DHY-Naht	t [mm]	ϕ [°]
DHY-1	40	0
DHY-2	40	10
DHY-3	40	50
DHY-4	40	80
DHY-5	40	90
HY-Naht	t [mm]	ϕ [°]
HY-1	20	0
HY-2	20	20
HY-3	20	80

Die Rissfortschrittssimulationen erfolgten für die Blechdicken $t = 20$ mm (HY-Naht) und $t = 40$ mm (DHY-Naht).

In Bild 4-12 und Bild 4-13 sind die K-Faktoren in Abhängigkeit der Restspaltgröße bei variablem Winkel ϕ für die DHY- und HY-Naht dargestellt.

Für die DHY-Nahtverbindung nehmen die Spannungsintensitätsfaktoren mit zunehmendem Restspalt zu. Weiterhin nehmen für große Restspaltlängen und für kerbbarme Nähte mit kleineren Nahtüberhöhungen ϕ die Spannungsintensitätsfaktoren ab. Je größer der Nahtüberhöhungswinkel ϕ wird, desto stärker macht sich die Kerbwirkung am Übergang Schweißnaht-Gurndwerkstoff bemerkbar. Die Spannungstrajektorien in Beanspruchungsrichtung werden deswegen in Richtung der neuen Kerbe ablenkt und entlasten folglich die Risspitze.

Für die Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren wurde deswegen auf der sicheren Seite liegend das Modell der plangeschliffenen Schweißnaht verwendet, das einem Tangentwinkel von $\phi = 0^\circ$ entspricht.

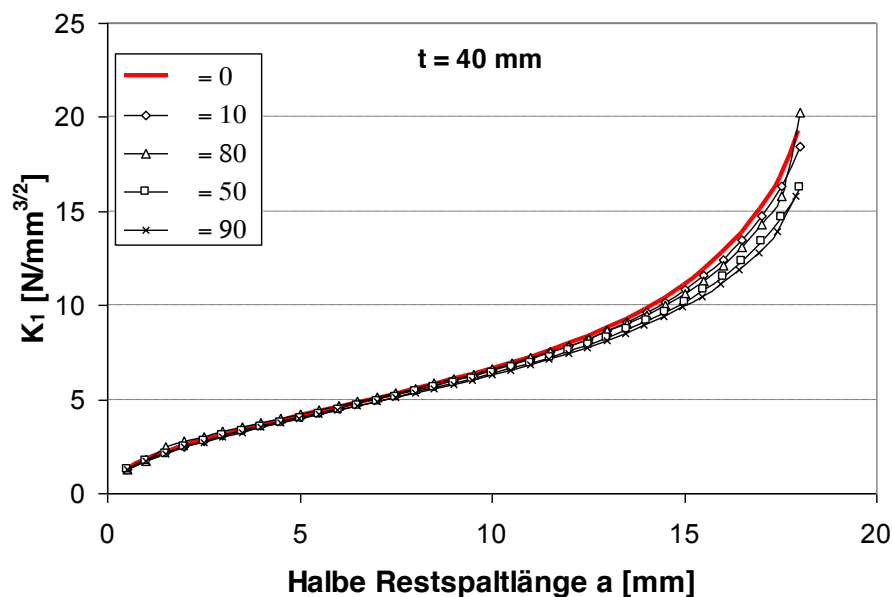


Bild 4-12 Vergleich der K-Werte unter Variation des Winkels ϕ für die DHY-Naht

Bei der HY-Naht wird eine gute Übereinstimmung der K-Werte bei Variation des Winkels ϕ bis zu einer Restspaltlänge von 8 mm erreicht. Bei zunehmender Restspaltgröße nehmen die K-Faktoren unter Berücksichtigung der Schweißnahtüberhöhung stärker zu als bei Betrachtung der plangeschliffenen Naht. In diesem Zusammenhang wird auf Abschnitt. 4.2.7, Bild 4-22 verwiesen. Es bestätigt sich, dass die Schweißnahtüberhöhung unter Anwendung von Handrechenformeln keinen maßgeblichen Einfluss auf die Ermittlung der K-Werte hat. Zudem wird in Abbildung 4-27 gezeigt, dass die Ergebnisse, die aus den Handrechenformeln resultieren, konservativer als die numerisch ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren sind. Demzufolge, können die Ergebnisse zum Einfluss des Tangentwinkels ϕ für HY-Schweißverbindungen in Bild 4-13 im Hinblick auf die spätere Parameterstudie vernachlässigt werden.

Für die weiteren Simulationen wurde somit sowohl für die DHY- als auch für die HY-Nahtverbindung vereinfacht eine Rechteckplatte ohne Schweißnahtüberhöhung angenommen.

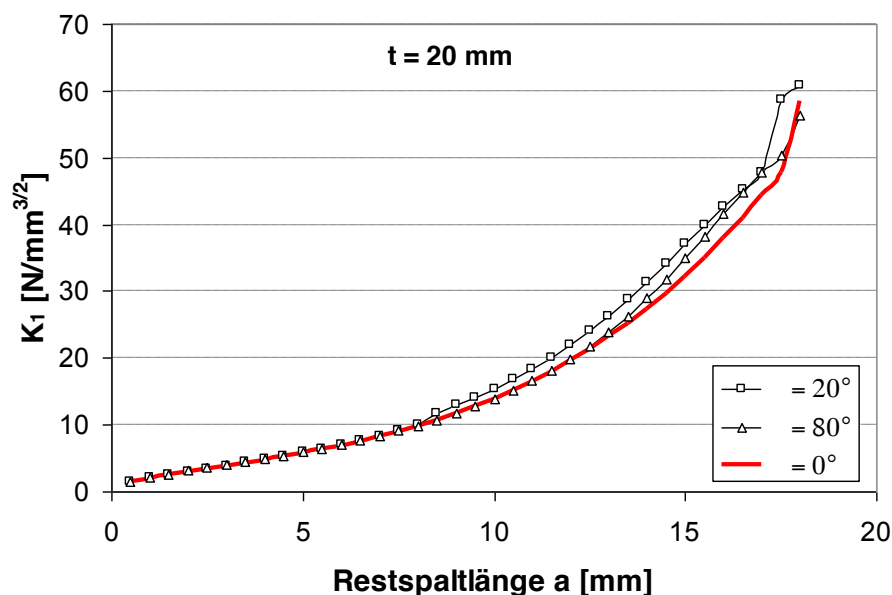


Bild 4-13 Vergleich der K-Werte unter Variation des Winkels ϕ für die HY-Naht

4.2.5 Einfluss der Bauteilbreite w

Der Einfluss der Bauteilbreite w wurde am dreidimensionalen Modell untersucht. Für die Bauteilabmessungen der hier zu untersuchenden Modelle sowie für die gewählte Rissgeometrie konnte die automatisierte Rissfortschrittsberechnung nicht genutzt werden, vgl. Abschnitt 4.1.2. Da BEASY bei der Rissmodellierung Elemente konstanter Größe verwendet, wurden die hier zu untersuchenden Risse durch zu viele Elemente diskretisiert. Dies führte zu sehr hohem Rechenaufwand und zu sehr hoher Rechenzeit, sodass das Programm schließlich eine Fehlermeldung anzeigte. Als Alternative zur automatisierten Rissfortschrittsberechnung wurden die Risse über die graphische Oberfläche BEASY-IMS manuell eingefügt und die Spannungsintensitätsfaktoren an der Risspitze berechnet, wobei die Rissfront konstant über die Breite verlief. Folglich musste eine kontinuierliche Optimierung des immer wieder neu zu generierenden Elementnetzes stattfinden.

In Bild 4-14 und Bild 4-15 sind die mit der Breite w modifizierten Referenzmodelle für die DHY- und HY-Naht dargestellt. Die Blechdicken wurden mit $t = 20$ mm (DHY-Naht) und $t = 10$ mm (HY-Naht) aufgrund des hohen Rechenaufwands reduziert. Die Schweißnahtüberhöhung musste aufgrund der aus den 2D-Berechnungen erzielten Ergebnisse nicht weiter untersucht werden.

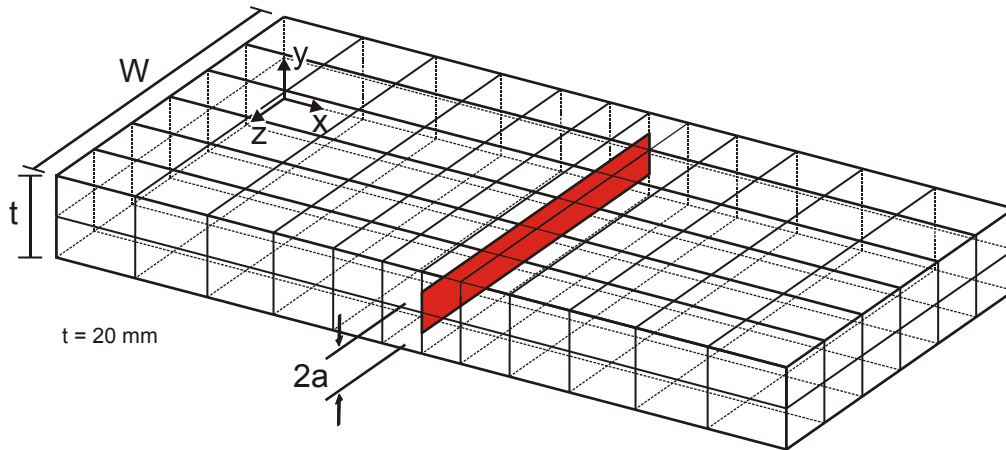


Bild 4-14 DHY-Naht (3D) mit einer Breite $w = 100$ mm und Dicke $t = 20$ mm; mit Innenriss

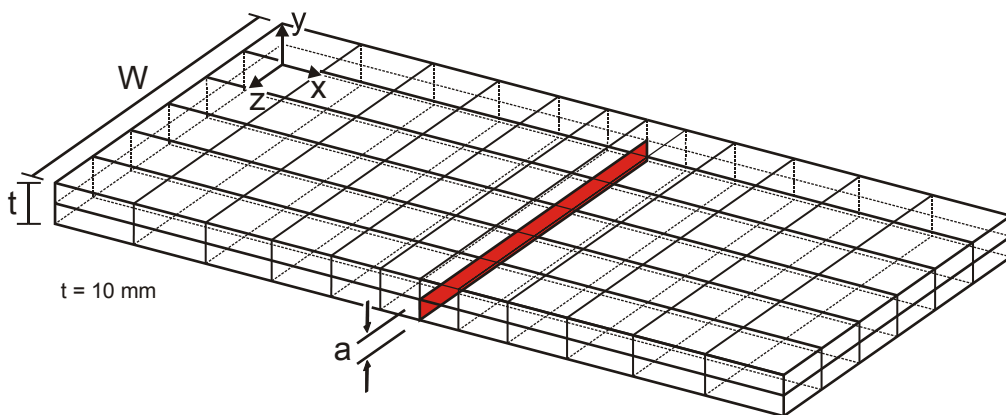


Bild 4-15 HY-Naht (3D) mit einer Breite $w = 100$ mm und Dicke $t = 10$ mm; mit Randriss

In den 3D-Berechnungen wurden die Spannungsintensitätsfaktoren entlang der Rissfront sowohl mit der Crack Opening Displacement Methode als auch nach dem J-Integral-Konzept berechnet, vgl. Abschnitt 2.2.2. In Anhang C.1 sind die Verläufe der K-Faktoren für das Referenzmodell entlang der Rissfront für eine Zugspannung von $\Delta\sigma = 1$ N/mm² und der Vergleich zwischen der CTOD- und der J-Integral-Methode dargestellt.

Es stellte sich heraus, dass die bruchmechanische Beanspruchung entlang der Rissfront unterschiedliche Werte annimmt. Als sichere Seiten Annahme wurden deswegen ausschließlich die Maximalwerte der Spannungsintensitätsfaktoren weiterverwendet. Der zahlenmäßige Unterschied der nach CTOD- und J-Integral-Methode ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren ist jedoch geringfügig. Trotzdem wurden zur Nachweisführung zur Vermeidung von Sprödbruch die leicht konservativeren CTOD-Werte verwendet.

Bild 4-16, links, zeigt die so ermittelten maßgeblichen Spannungsintensitätsfaktoren sowie einen Vergleich mit der 2D-Rechnung. Die bruchmechanische Beanspruchung bleibt für $a \leq 5$ mm mit zunehmender Blechbreite nahezu konstant; für $a > 5$ mm nimmt die sie mit zunehmender Breite ab, Bild 4-16, rechts.

Ein Vergleich der aus der zweidimensionalen SIF-Berechnung ermittelten K-Werte zeigt gute Übereinstimmung mit denjenigen aus der räumlichen Berechnung. Lediglich für kleine Blechbreiten $w \leq 100$ mm und für Restspalte mit $a \geq 5$ mm wird der K-Wert geringfügig unterschätzt.

Insbesondere für kleine Risslängen besitzt die Bauteilbreite keinen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse.

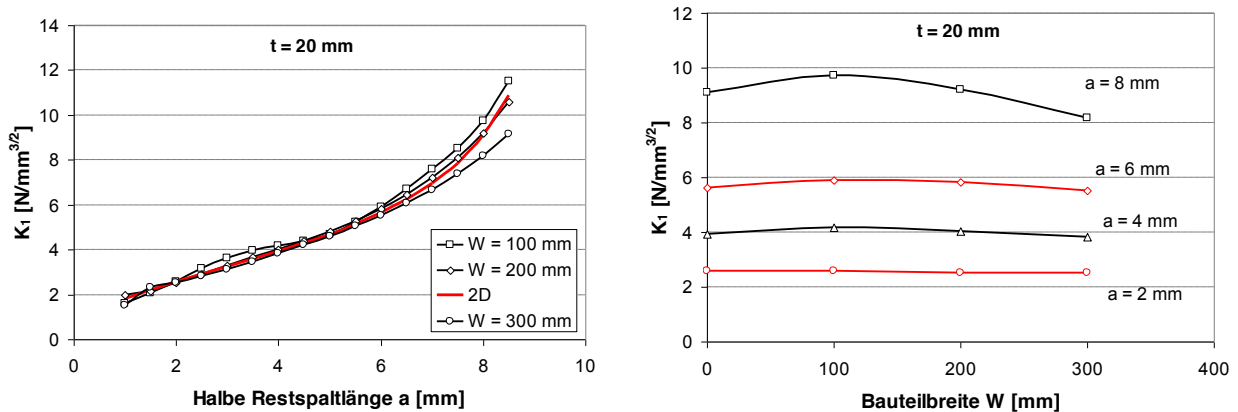


Bild 4-16 K-Werte aus 3D- und 2D-Berechnungen für $t = 20 \text{ mm}$; DHY-Naht

Für den Fall der HY-Naht liegen die Spannungsintensitätsfaktoren aus der zweidimensionalen Berechnung bei zunehmender Restspaltlänge deutlich oberhalb der K-Faktoren, die aus der dreidimensionalen Berechnung resultieren, s. Bild 4-17, links. Insbesondere für große Restspalte liegen für die zweidimensionale SIF-Berechnung deutlich konservative K-Werte vor.

Ähnlich wie bei DHY-Nähten nehmen auch hier die K-Werte für kleinere Restspalte über die Bauteilbreite ab, s. Bild 4-17, rechts. Die Abnahme der bruchmechanischen Beanspruchung ist mit zunehmender Restspaltgröße jedoch deutlich ausgeprägter.

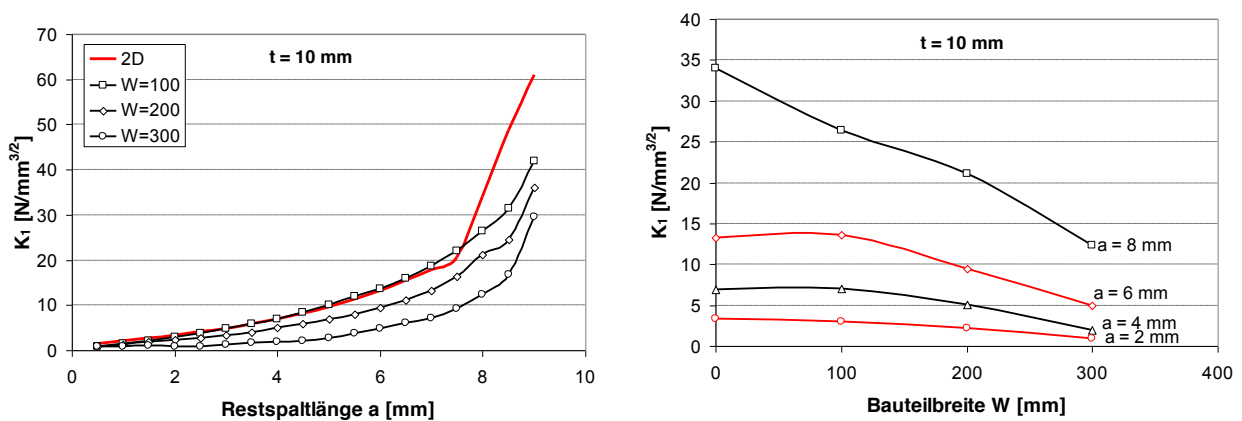


Bild 4-17 Verlauf der K-Werte über die Bauteilbreite w für verschiedene Restspalte; DHY-Naht

4.2.6 Handrechenformeln nach Murakami

Als Alternative zur numerischen Berechnung wurden analytische Methoden zur Bestimmung der Spannungsintensitätsfaktoren herangezogen. Als Grundlage diente die allgemeine Formel nach Gl. (2-2).

Unter Annahme einer endlich großen Rechteckplatte konnte die SIF-Korrekturfunktion Y nach Murakami [29] sowohl für den Innenriss als auch für den Randriss verwendet werden.

Aufgrund der in den Voruntersuchungen erzielten Ergebnisse konnte die Schweißnahtüberhöhung vernachlässigt werden. Demzufolge wurde die Korrekturfunktion zur Erfassung der Bauteilgeometrie mit $M_k = 1$ gewählt.

4.2.6.1 DHY-Naht

Für die Variante der DHY-Naht konnten die Handrechenformel für eine endlich große Rechteckplatte mit mittigem Durchriss nach Murakami [30] verwendet werden, s. Bild 4-18.

Die Korrekturfunktion Y zur Erfassung der Rissgeometrie kann Gl. (4-2) entnommen werden.

$$Y = \left(1 - 0,025 \cdot \alpha^2 + 0,06 \cdot \alpha^4\right) \sqrt{\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}} \quad (4-2)$$

mit

$$\alpha: \quad \alpha = \frac{2a}{W}$$

w: Zugblechdicke [mm]

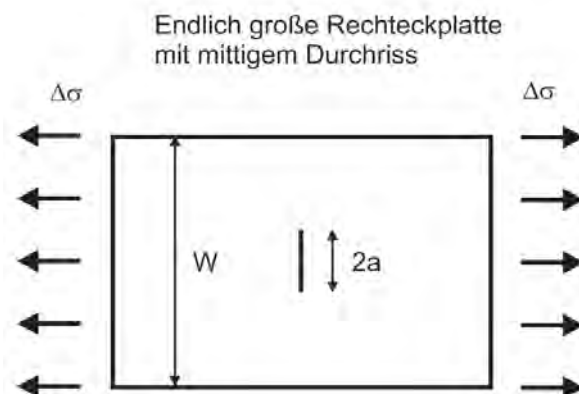


Bild 4-18 Endlich große Rechteckplatte mit mittigem Durchriss nach Murakami [30]

4.2.6.2 HY-Naht

Für die Variante der HY-Naht konnten die Handrechenformel für eine endlich große Rechteckplatte mit einseitigem Randriss nach Murakami [30] verwendet werden, s. Bild 4-19.

Die Korrekturfunktion Y zur Erfassung der Rissgeometrie kann Gl. (4-3) entnommen werden.

$$Y = 1,12 - 0,231 \cdot \alpha + 10,55 \cdot \alpha^2 - 21,72 \cdot \alpha^3 + 30,39 \cdot \alpha^4 \quad (4-3)$$

mit

$$\alpha: \quad \alpha = \frac{2a}{W}$$

w: Zugblechdicke [mm]

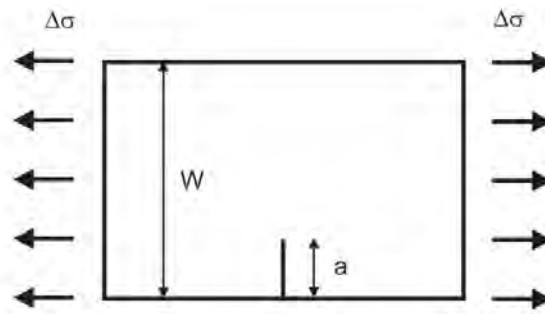


Bild 4-19 Endlich große Rechteckplatte mit Randriss nach Murakami [30]

4.2.7 Vergleich der numerisch ermittelten Ergebnisse und der Handrechenformeln

Der Vergleich am Referenzmodell zeigt, dass für DHY-Nähte die Handrechenformeln nach Murakami mit den numerisch bestimmten Spannungsintensitätsfaktoren sehr gut übereinstimmen, vgl. Bild 4-20.

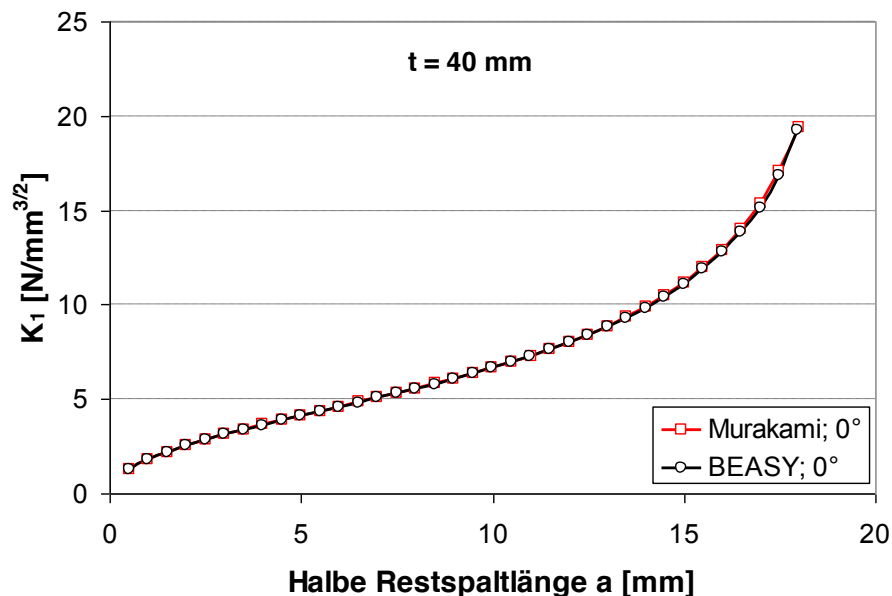


Bild 4-20 Vergleich der numerisch ermittelten K-Faktoren mit den Handrechenformeln (DHY-Naht)

Es sind keine nennenswerten Unterschiede zu erkennen. Die Abweichungen betragen weniger als 2 %. Zudem werden die mit den Handrechenformeln ermittelten K-Werte für Restspalte mit $a \geq 2,5$ mm sicher abgedeckt. Für kleinere Restspalte liegt der Fehler unter 2%, vgl. Bild 4-21. Demzufolge konnten für die Parameterstudie im Fall der DHY-Naht die Handrechenformeln genutzt werden.

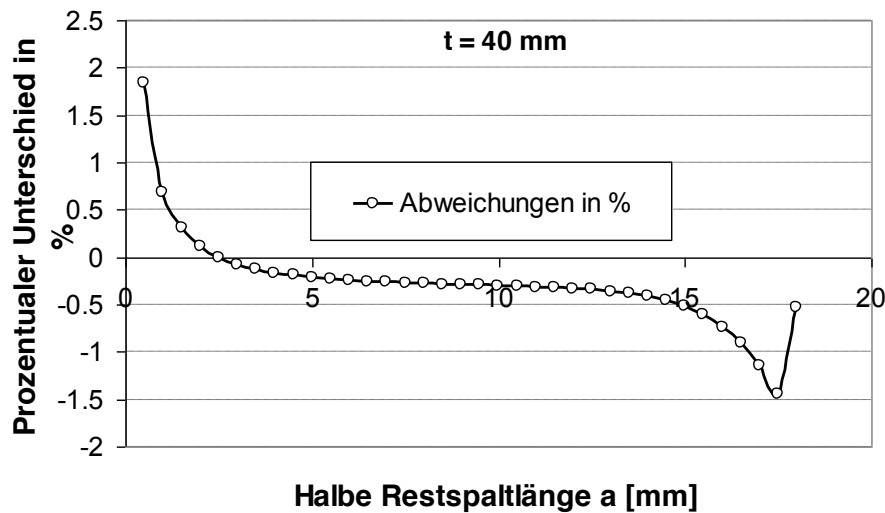


Bild 4-21 Abweichungen der K-Faktoren zwischen BEASY und Handrechenformeln (DHY-Naht)

Bei Betrachtung der HY-Naht ist eine gute Übereinstimmung der numerisch ermittelten Werte mit denjenigen nach Murakami ermittelten Werten bis zu einer gewissen Risslänge zu erkennen. Bei größer werdender Risslänge nehmen die analytisch berechneten K-Werte exponentiell zu und liegen deutlich oberhalb der mit BEASY ermittelten K-Faktoren, vgl. Bild 4-22.

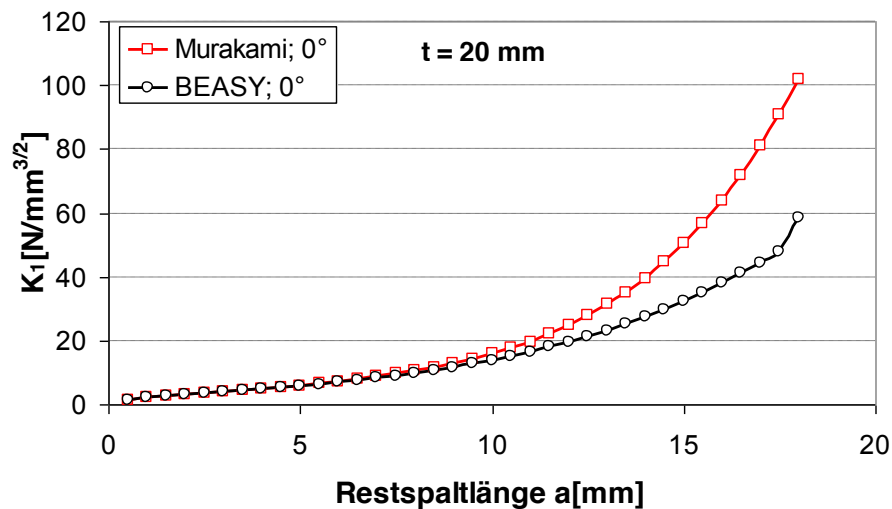


Bild 4-22 Vergleich der numerisch ermittelten K-Faktoren mit den Handrechenformeln (HY-Naht)

Die Spannungsintensitätsfaktoren werden für die HY-Naht mit $\phi = 0^\circ$ durch die Handrechenformeln nach Murakami konservativ abgedeckt, sodass für die weitere Parameterstudie auf den vereinfachten Fall einer Rechteckplatte mit Randriss nach Murakami zurück gegriffen werden konnte.

4.2.8 Validierung hinsichtlich Rissfortschritt

In einfachen Fällen kann durch direkte Integration der Paris-Gleichung in Abhängigkeit der Werkstoffparameter C und m auf eine zum zyklischen Spannungsintensitätsfaktor zugehöri-

ge Lastspielzahl N zurückgeschlossen werden. Steigt die Komplexität der Gleichung für den Spannungsintensitätsfaktor ist eine direkte Integration in vielen Fällen nicht mehr möglich und es muss auf Näherungslösungen zurückgegriffen werden. Durch Vorgabe eines Rissinkrementes Δa kann durch fortlaufendes Aufsummieren der zugehörigen Lastspielzahlen ΔN die Gesamtspielzahl N berechnet werden. Je kleiner das Inkrement Δa gewählt wird, desto genauer wird die Lösung approximiert. Deswegen mussten die angenäherten Rissfortschrittsberechnungen durch Wahl eines geeigneten Wertes Δa anhand der numerischen Ergebnisse kalibriert werden.

In Bild 4-23 sind die Ergebnisse aus den Rissfortschrittsberechnungen für eine Blechdicke $t = 40$ mm unter Variation des Rissinkrementes Δa dargestellt. Die Werkstoffparameter wurden zu $C = 5,21 \cdot 10^{-13}$ und $m = 3$ gemäß [18] gewählt, die Zugbeanspruchung beträgt $\Delta\sigma = 100$ N/mm².

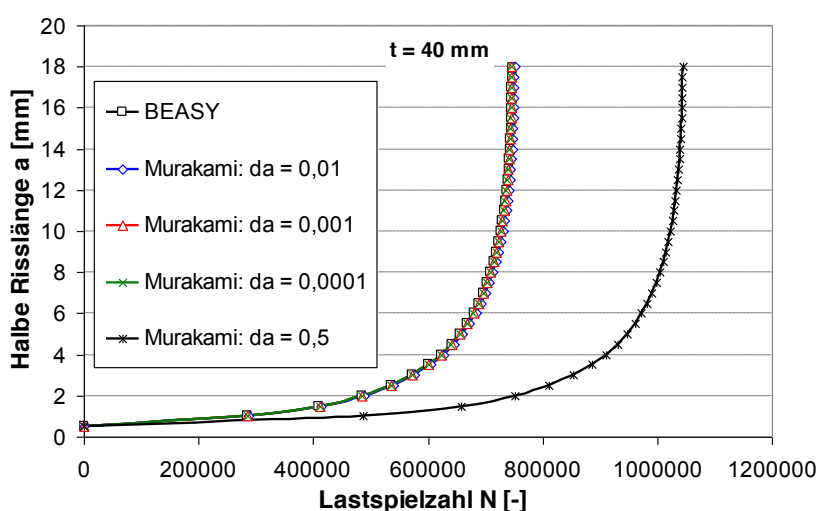


Bild 4-23 Vergleich der Lastspielzahlen N ; DHY-Naht

Je feiner der Risszuwachs Δa gewählt wird, desto besser stimmen die analytisch berechneten Lastspielzahlen mit denjenigen aus der numerischen Berechnung überein.

Während für ein $\Delta a = 0,5$ mm die Abweichungen ca. 40 % auf der unsicheren Seite liegen, werden mit einem Rissinkrement $\Delta a = 0,001$ mm sehr gute Übereinstimmungen mit BEASY erzielt, vgl. Tabelle 4-3. Aus diesem Grund wurde für nachfolgende Fortschrittsberechnungen ein Rissinkrement $\Delta a = 0,001$ mm gewählt, das die Ergebnisse aus BEASY sicher abdeckt.

Tabelle 4-3 Untersuchung des Rissinkrementes Δa

Δa [mm]	N [-]	Abweichung [%]
0,5	1044143	39,8
0,01	750836	0,51
0,001	746431	-0,08
0,0001	745993	-0,13
BEASY	747001	-

4.2.9 Einfluss von weiteren Oberflächendefekten

Neben dem Restspalt können gleichzeitig weitere Ungängen in einem Bauteil auftreten. In diesem Zusammenhang wurde der Einfluss des standardisierten halb elliptischen Oberflächenrisses gemäß EN 1993-1-10 auf die Tragsicherheit des beanspruchten Bauteils untersucht, vgl. Abschnitt 2.3.

Diese Kerbe besitzt eine Kerbschärfe, die beim Nachweiskonzept zur Vermeidung von Sprödburch die Kerbfälle nach DIN EN 1993-1-9 [11] ausreichend konservativ abdeckt. Um ausschließen zu können, dass von diesem Defekt eine größere Gefährdung ausgeht, wurden im Folgenden Rissfortschrittsberechnungen zur Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren für den halb elliptischen Oberflächenriss am Schweißnahtübergang für eine Blechdicke $t = 20$ mm unter Variation der Blechweite w durchgeführt. Bild 4-24 zeigt den Vergleich zwischen den Restspalten und dem halb elliptischen Oberflächenriss.

Für den halb elliptischen Oberflächenriss erfolgten die Rissfortschrittsberechnungen nicht nur bis zur standardisierten Bemessungsrisstiefe a_d , sondern auch für weitaus größere Risstiefen, um einen besseren Vergleich zwischen Restspalten und Oberflächenriss ziehen zu können, vgl. Bild 4-24. Es zeigte sich, dass für restspaltbehaftete DHY- und HY-Nähte die Spannungsintensitätsfaktoren höhere Werte annehmen als bei Vorliegen eines halb elliptischen Oberflächenrisses. Demzufolge wird von den Restspalten eine höhere Spröbruchgefahr ausgehen.

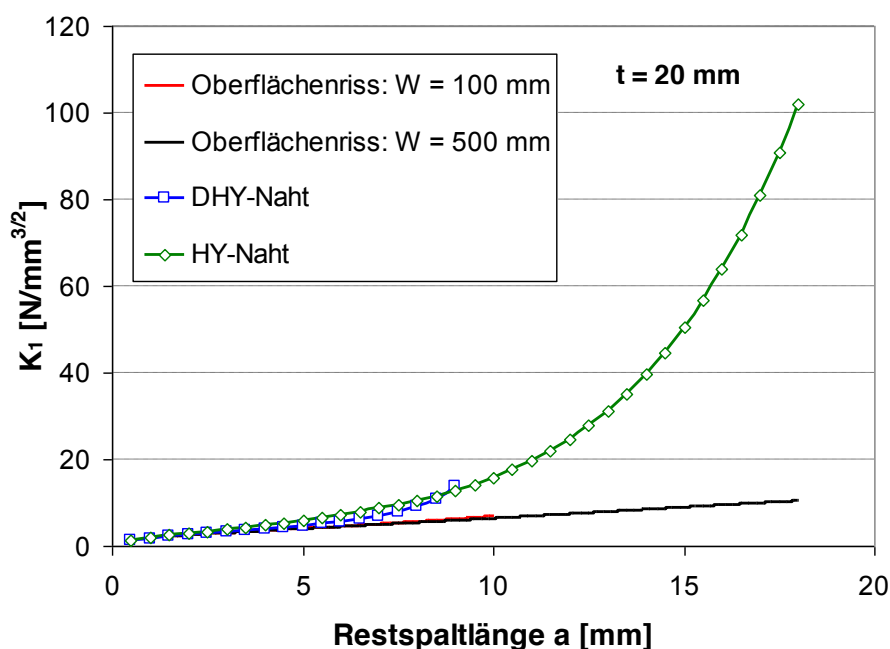


Bild 4-24 Vergleich der K-Werte für restspaltbehaftete Nähte und Oberflächenriss

4.2.10 Berücksichtigung von Exzentrizitäten

Die Spannungsintensitätsfaktoren wurden in den vorangehenden Abschnitten für den vereinfachten Fall einer reinen zentrischen Zugbeanspruchung abgeleitet. Im Folgenden werden Spannungsintensitätsfaktoren für DHY-Nahtverbindungen für exzentrisch beanspruchte Stumpfstoße ermittelt und denjenigen aus zentrischer Beanspruchung gegenübergestellt.

Dazu werden zunächst Voruntersuchungen an einem zweidimensionalen Referenzmodell, siehe Bild 4-25, zur Ermittlung der maßgebenden Elementgröße für die globale Vernetzung (Konvergenzuntersuchung) sowie zur Ermittlung der maßgebenden Rissvernetzung durchgeführt.

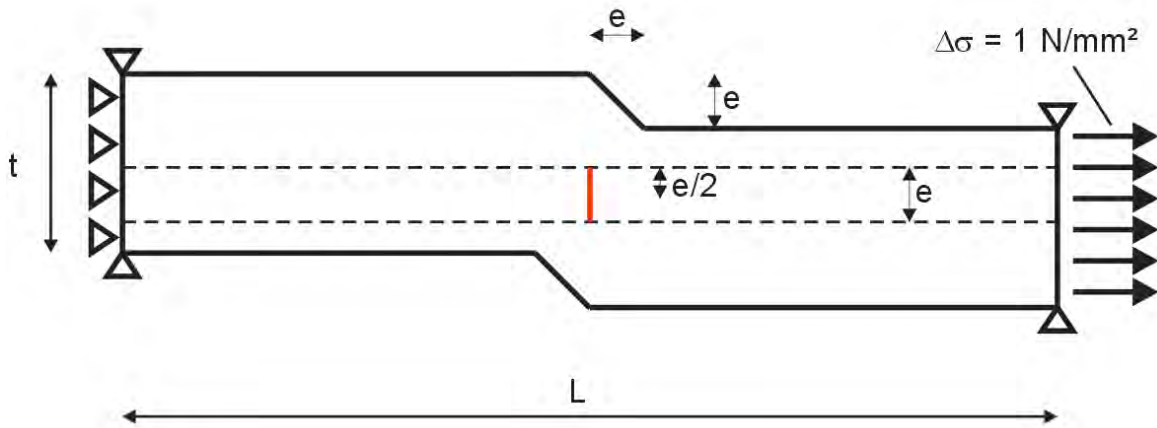


Bild 4-25 Referenzmodell der DHY-Stumpfstoßverbindung bei exzentrischem Anschluss

Infolge exzentrischer Beanspruchungen treten neben Membranspannungen zusätzlich Biegespannungen auf, so dass bei der Ermittlung des Spannungsintensitätsfaktors die Längsscherung (Modus II) berücksichtigt werden muss, vgl. Kap. 3.3.2. Bei einer derartig kombinierten Beanspruchung kann der effektive Spannungsintensitätsfaktor K_{eff} nach Gl. (4-4) ermittelt werden.

$$K_{eff} = \sqrt{(K_1 + |K_3|)^2 + 2 \cdot K_2^2} \quad (4-4)$$

4.2.10.1 Voruntersuchungen

Der Einfluss der Vernetzungsdichte wird am beidseitig gelagerten Referenzmodell mit einer Dicke $t = 40 \text{ mm}$ und einer Exzentrizität $e = 2 \text{ mm}$ unter einer Zugbeanspruchung am rechten Ende von $\Delta\sigma = 1 \text{ N/mm}^2$ untersucht. Die K-Faktoren werden dabei für einen Innenriss der Größe $2a = 2 \text{ mm}$ ($a = 1 \text{ mm}$) ermittelt. Für die bruchmechanische Berechnung ist der in Bild 4-26 dargestellte mittlere Bereich (Bereich A) maßgeblich. Die Elementgröße wird hier in Abhängigkeit der Exzentrizität e variiert. Die Elementgrößen im äußeren Bereich B bleiben dagegen konstant.

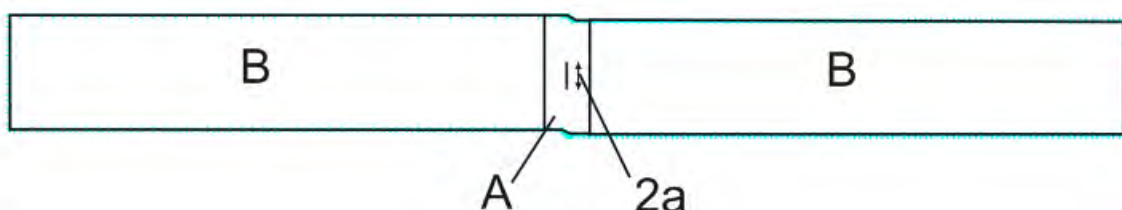


Bild 4-26 Schema der Vernetzung der exzentrisch gestoßenen Stumpfstoßverbindung

Tabelle 4-4 zeigt die variierten Elementgrößen im Bereich A für das Referenzteil mit $t = 40 \text{ mm}$ und der Exzentrizität $e = 20 \text{ mm}$.

Tabelle 4-4 Variation der Elementgröße im Bereich A für das Referenzmodell mit $t = 40$ mm und einer Exzentrizität $e = 2$ mm

Variations-Nr.	Elementgröße	
1	e	2,00 mm
2	e/2	1,00 mm
3	e/4	0,50 mm
4	e/6	0,30 mm
5	e/8	0,25 mm
6	e/10	0,20 mm

Die Berechnungen erfolgten sowohl unter Anwendung des CTOD-Verfahrens als auch nach der J-Integral-Methode. Der Vergleich zwischen J-Integral und CTOD zeigte, dass für die folgenden Berechnungen auf der sicheren Seite liegend die J-Integral-Methode verwendet werden darf. Bild 4-27 zeigt erneut die Unempfindlichkeit von BEASY im Hinblick auf die Diskretisierungsdichte. Im Hinblick auf die Rechenzeit wurde eine immer noch sehr feine Vernetzung mit einer durchschnittlichen Elementgröße $e/4$ gewählt.

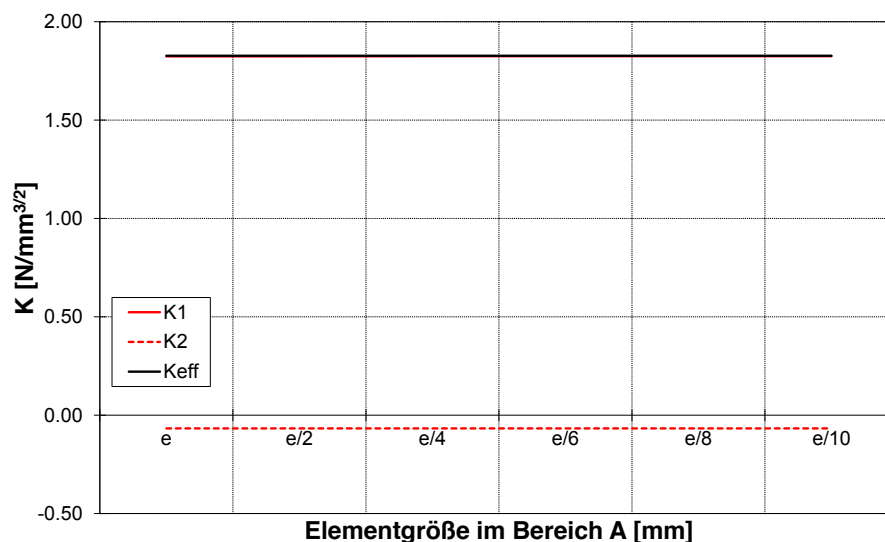


Bild 4-27 Schema der Vernetzung der exzentrisch gestoßenen Stumpfstoßverbindung

Die Vernetzungsdichte des Anfangsrisses zeigt gemäß Bild 4-28 keine großen Auswirkungen auf die bruchmechanische Beanspruchung. Das Diagramm ist das Ergebnis einer Untersuchung, bei der ein Anfangsriss der Größe $2a = 2$ mm unter Schwingbeanspruchung mittels Rissfortschrittsberechnung aufgeweitet wurde. Die erforderlichen Werkstoffparameter C und m wurden gemäß [17] zu $C = 1,8 \cdot 10^{-13}$ und $m = 3$ gewählt. Bei der Wahl des Innenrisses wurden zwei Varianten untersucht:

- Variante 1: Modellierung des Risses mit 2 Elementen (Two Tips 2 Elements Crack).

- Variante 2: Modellierung des Risses mit 20 Elementen (Two Tips 20 Elements Crack)

Bild 4-28 zeigt, dass auch hierbei die Netzdichte keinen nennenswerten Einfluss auf die Größe des Spannungsintensitätsfaktors hat. Beide Berechnungen liefern nahezu identische Ergebnisse. Für die weiteren Berechnungen wurde deswegen, auch aus Zeitgründen, die einfache Variante 1 mit zwei Risselementen am Anfangsrisse gewählt.

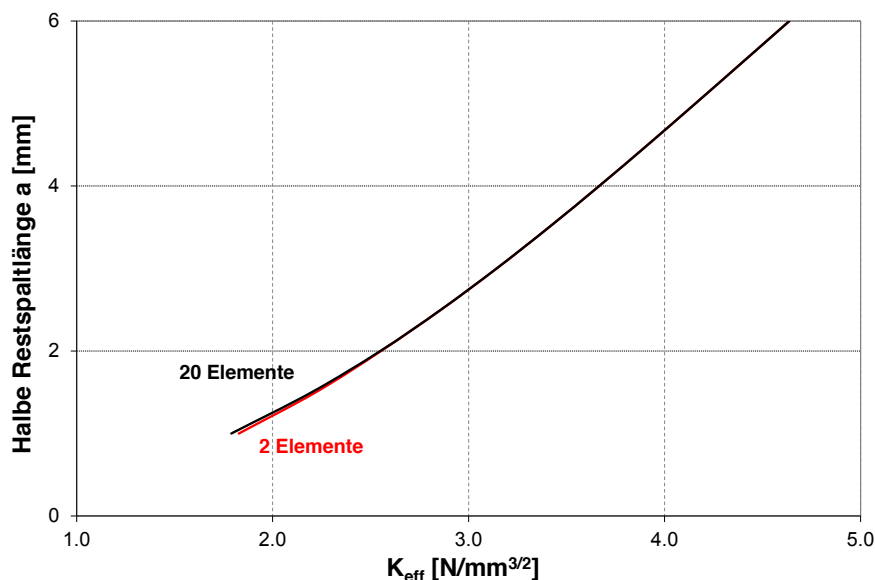


Bild 4-28 Einfluss der Rissvernetzungsichte auf die bruchmechanische Beanspruchung

4.2.10.2 Spannungsintensitätsfaktoren unter Berücksichtigung exzentrischer Schweißung

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der vorangehenden Voruntersuchungen wurden Rissfortschrittsberechnungen für unterschiedliche Exzentrizitäten e durchgeführt. Diese nahmen dabei Werte von 1 mm bis 30 mm an, wobei sehr große Exzentrizitäten eher theoretischer Natur sind und nicht praxistgerecht. Bild 4-29 zeigt den Vergleich der Spannungsintensitätsfaktoren für DHY-Nähte, die mit exzentrischer Schweißung ermittelt wurden mit der Referenzkurve der Spannungsintensitätsfaktoren für zentrische Anschlüsse.

Für Restspaltlängen bis zu ungefähr $a = 15$ mm sind die Spannungsintensitätsfaktoren K_{exz} für exzentrische Schweißanschlüsse erwartungsgemäß größer als diejenigen für zentrische Spannungsintensitätsfaktoren K_{zent} . Für $a > 15$ mm kehrt sich dieses Verhalten jedoch um, und K_{zent} nimmt konservativere Werte an. Aus praxisrelevanter Sicht ist dieser Restspaltlängenbereich jedoch von untergeordneter Bedeutung. Bild 4-30 zeigt den Vergleich zwischen K_{exz} und K_{zent} für ausgewählte Exzentrizitäten e in zweckmäßigerer Darstellung.

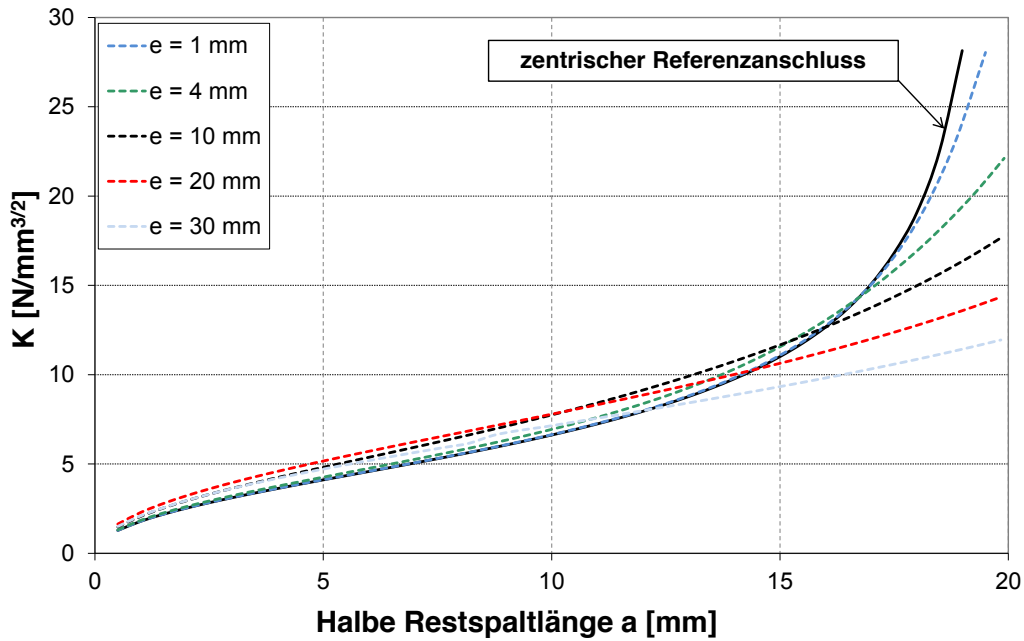


Bild 4-29 Spannungsfaktoren K_{exz} für DHY-Stumpfstoßverbindungen unter Berücksichtigung der Exzentrizität e

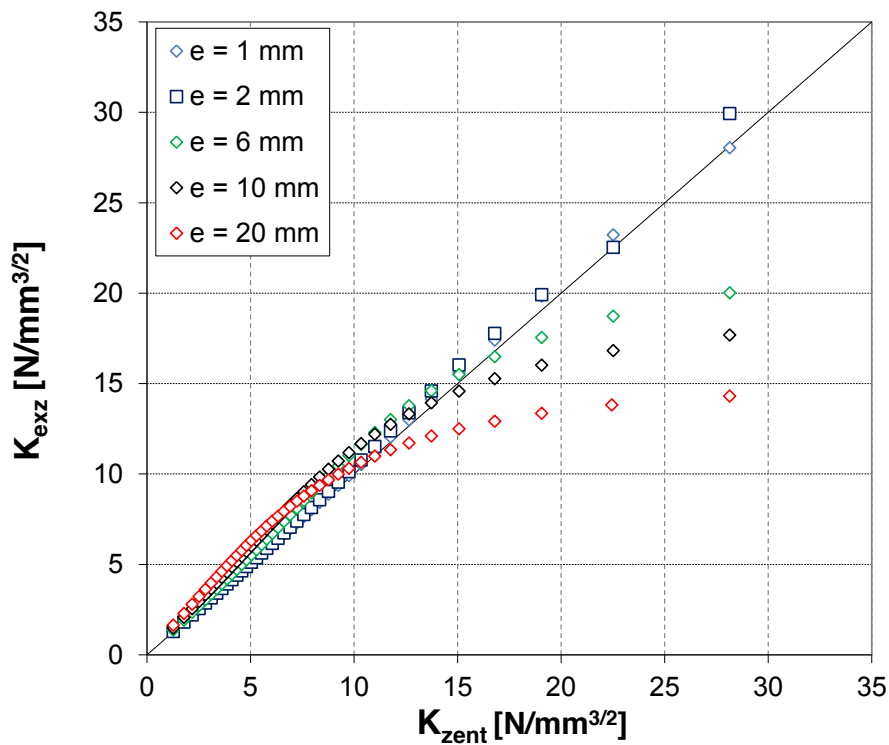


Bild 4-30 Vergleich von K_{exz} mit K_{zent} für DHY-Stumpfstoßverbindungen

4.2.10.3 Einführung des Vergrößerungsfaktor k_m

Geometrische Abweichungen von den Sollvorgaben (Imperfektionen, s. Bild 4-31) einer geschweißten Verbindung führen in der Regel zu zusätzlichen Sekundärspannungen, die beispielsweise wie im vorliegenden Fall aus dem exzentrischen Anschluss eines Stumpfstoßes herrühren.

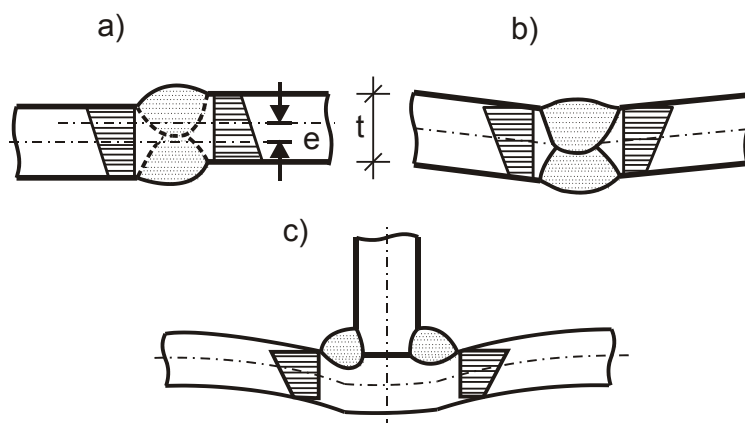


Bild 4-31 Geometrische Imperfektionen geschweißter Verbindungen [18]

Diese zusätzlichen Biegemomente erhöhen somit die auf einer perfekten Verbindung basierenden Querschnittsspannungen um einen Faktor k_m . Die IIW-Richtlinie [18] enthält z.B. einen Formelkatalog für verschiedenartige geometrische Imperfektion für k_m . Dieser k_m -Faktor erhöht beispielsweise in einer Ermüdungsanalyse einer geschweißten Verbindung auf der Einwirkungsseite den ursprünglichen Wert der Bemessungsspannung.

$$\sigma_{imp} = k_m \cdot \sigma_n \quad (4-5)$$

mit

σ_{imp} : Spannung unter Berücksichtigung sekundärer Biegemomente aus Schweißimperfektionen

σ_n : Nennspannung

Für den Fall der Exzentrizität der Schweißverbindung in Bild 4-25 ist gemäß IIW-Richtlinie k_m wie folgt zu berechnen:

$$k_m = 1 + \lambda \cdot \frac{e \cdot l_1}{t \cdot (l_1 + l_2)} \quad (4-6)$$

mit

λ : Faktor zur Berücksichtigung der Einspannverhältnisse der Verbindung; bei uneingeschränkter Lagerung gilt $\lambda = 6$.

e : Exzentrizität

l_1, l_2 : Plattenlänge gemäß Bild 4-32

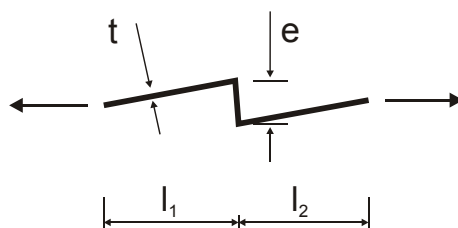


Bild 4-32 Axiale Schweißimperfektionen von Flachblechen [18]

Es ist korrekterweise zu betonen, dass die Berechnung des k_m -Faktors nach Gl. (4-6) aus Ermüdungsuntersuchungen hinsichtlich des Versagens am Schweißnahtübergang zum Grundmaterial basiert. Für den vorliegenden Fall mit Restspalten im Bauteilinneren wird die Anwendbarkeit dieser Formel in Ermangelung an Handrechenformeln für das Wurzelversagen der Schweißnaht überprüft. Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen Spannung und Spannungsintensitätsfaktors in der LEBM wird der Spannungsintensitätsfaktor K_{zent} mit dem Vergrößerungsfaktor k_m aus Gl. (4-6) modifiziert und mit K_{exz} verglichen.

$$K_{zent,mod} = k_m \cdot K_{zent} \quad (4-7)$$

mit

$K_{zent,mod}$: Mit dem Faktor k_m modifizierter Spannungsintensitätsfaktor

Bild 4-33 zeigt, dass unter Berücksichtigung des Faktor $\lambda = 6$ deutlich konservativere Ergebnisse erzielt werden als die tatsächliche exzentrische Berechnung; je größer die Exzentrizität wird, desto größer wird auch das Sicherheitselement bei Anwendung der k_m -Formel. Das Diagramm beruht auf der Auswertung von der am Referenzmodell gemäß Bild 4-7 ermittelten bruchmechanischen Beanspruchungen bei Variation der Restspaltlängen von $a = 0,5$ mm bis zu 20 mm. Für die Plattenlängen l_1 und l_2 gilt $l_1 = l_2$.

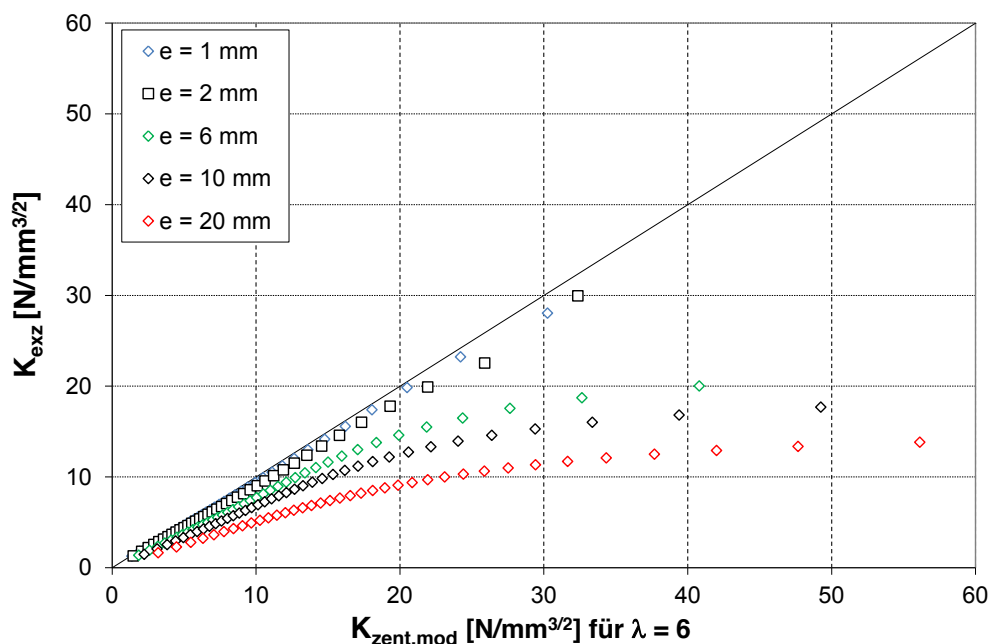


Bild 4-33 Vergleich von K_{exz} und $K_{zent,mod}$ mit $\lambda = 6$ für Restspaltlängen bis $a = 20$ mm

Aufgrund der sehr hohen Konservativität werden in einem nächsten Schritt die $K_{zent,mod}$ -Werte für den kleinstmöglichen λ -Faktor ermittelt, so dass dies zu k_m -Faktoren führt, die weniger konservativ als für $\lambda = 6$ sind, aber hinsichtlich einer geringfügigen Sicherheitsunterschreitung immer noch vertretbar sind. Für den vorliegenden Fall wird dieses Ziel mit $\lambda = 1,7$ erreicht, Bild 4-34. Für kleine Exzentrizitäten von 0 mm bis 2 mm wird die tatsächliche bruchmechanischen Beanspruchung K_{exz} bei Anwendung der Formeln (4-5) (4-6) mit $\lambda = 1,7$ um weniger als 2 % unterschritten. Wird die Exzentrizität größer als $e = 2,0$ mm, so liefert der Wert $\lambda = 1,7$ konservative Ergebnisse.

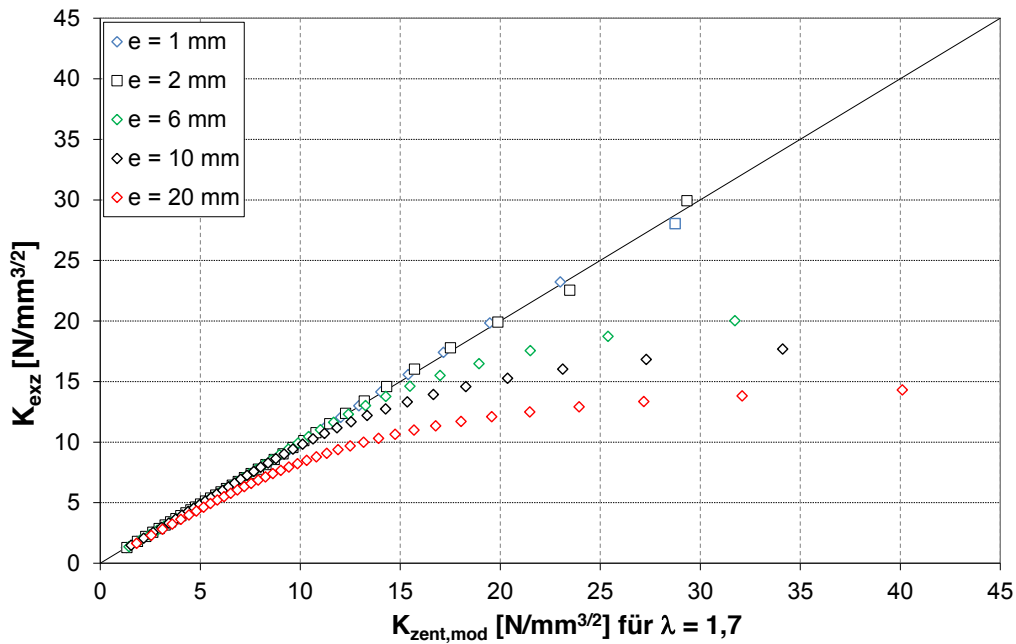


Bild 4-34 Vergleich von K_{exz} und $K_{\text{zent,mod}}$ mit $\lambda = 1,7$ für Restspaltlängen bis $a = 20$ mm

4.2.10.4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass Schweißimperfectionen die bruchmechanische Beanspruchung beeinflussen. Dadurch können sekundäre Biegemomente entstehen, die die im Bauteil wirkenden Spannungen maßgeblich erhöhen. Ermüdungsrichtlinien, wie z.B. die IIW-Richtlinie [18], stellen dazu tabellierte Vergrößerungsfaktoren k_m bereit, mit denen die Nennspannungen auf der Einwirkungsseite modifiziert werden. Dieses Vorgehen ist auf die vorliegenden auf bruchmechanischen Methoden beruhenden Restspaltuntersuchungen sinngemäß übertragbar. Dies wurde explizit an exzentrisch verschweißten Stumpfstoßverbindungen gezeigt.

Für Kreuzstoßverbindungen liegen ebenso Handrechenformeln für k_m -Vergrößerungsfaktoren gemäß IIW-Dokument vor. Bei Schweißimperfectionen wird ausdrücklich empfohlen, mögliche Spannungserhöhungen durch Anwendung der Vergrößerungsfaktoren k_m zu verwenden.

4.2.11 Aus den Voruntersuchungen abgeleitete Schlussfolgerungen

Aus den Voruntersuchungen können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Der Einfluss der Vernetzungsdichte spielt bei der Modelldiskretisierung keine wesentliche Rolle. Die mit den hier untersuchten Elementgrößen erzielten Ergebnisse zeigten nur vernachlässigbar geringe Unterschiede.
2. Die Handrechenformeln nach Murakami decken die numerisch ermittelten K-Faktoren auch unter Berücksichtigung der Schweißnahtüberhöhung (Tangentenwinkel ϕ) auf der sicheren Seite liegend ab.
3. Weiterhin decken die Handrechenformeln auch den Größeneffekt bei Berücksichtigung der Bauteilbreite w ausreichend sicher ab.

4. Für die Rissfortschrittsrechnungen hat sich ein Rissinkrement $\Delta a = 0,001$ mm als geeignet erwiesen.
5. Schweißimperfectionen können zu Spannungserhöhungen infolge sekundärer Biegemomente führen. Dies sollte beim Bauteilnachweis durch Modifizierung der für das Bauteil maßgeblich gültigen Bemessungsspannungen mit dem Vergrößerungsfaktor k_m , z.B. nach [18], berücksichtigt werden.

4.3 Parameterstudie

Die Parameterstudien wurden für die DHY- und die HY-Naht in einem in der Praxis üblichen Parameterbereich durchgeführt. Auf Grundlage der vorangehenden Ergebnisse wurden für die Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren Handrechenformeln aus der Literatur [30] verwendet. Es erfolgten automatisierte Rissfortschrittsberechnungen zur Bestimmung der Spannungsintensitätsfaktoren basierend auf das Risswachstumsgesetz nach Paris unter Variation der Blechdicke t . Die Ergebnisse flossen später in den Spröbruchnachweis zur Ermittlung der zulässigen Restspaltlänge ein. Tabelle 4-5 stellt die verwendeten Parameter dar.

Tabelle 4-5 Variation der Blechdicke t ; DHY-Naht und HY-Naht

DHY-Naht	t [mm]	ϕ [°]
DHY-1	10	0
DHY-2	20	0
DHY-3	30	0
DHY-4	40	0
DHY-5	50	0
DHY-6	60	0
DHY-7	70	0
DHY-8	80	0
DHY-9	90	0
DHY-10	100	0
HY-Naht	t [mm]	ϕ [°]
HY-1	10	0
HY-2	20	0
HY-3	30	0
HY-4	40	0

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl für DHY- als auch für HY-Nähte die Spannungsintensitätsfaktoren mit zunehmender Bauteildicke und zunehmender Restspaltgröße ebenfalls zunehmen, vgl. Abbildungen Bild 4-35.

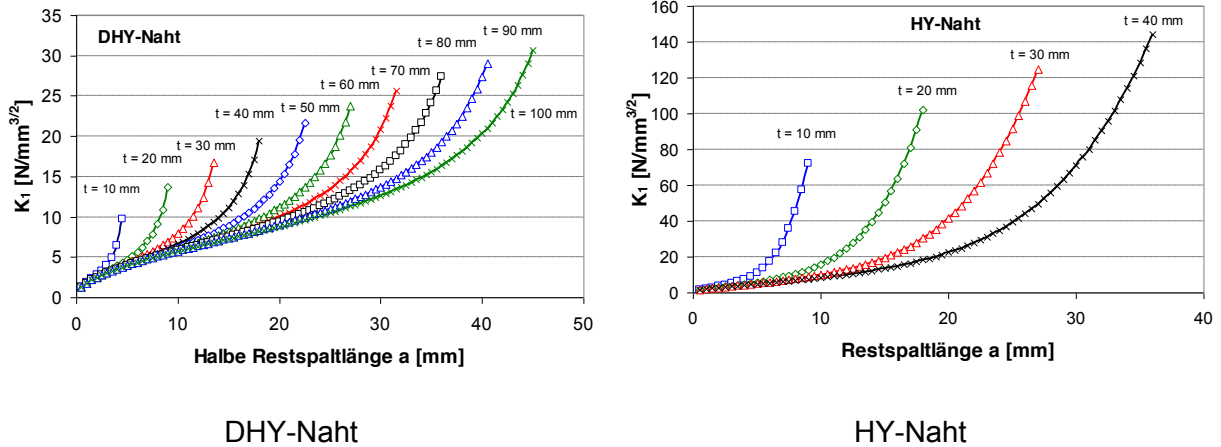


Bild 4-35 Vergleich der K-Werte bei variablem t für die DHY-Naht (links) und HY-Naht (rechts)

Zudem weisen die kritischeren einseitig geschweißten Stumpfnahte erwartungsgemäß deutlich höhere Spannungsintensitätsfaktoren auf als zweiseitig geschweißte Nähte, vgl. Bild 4-36.

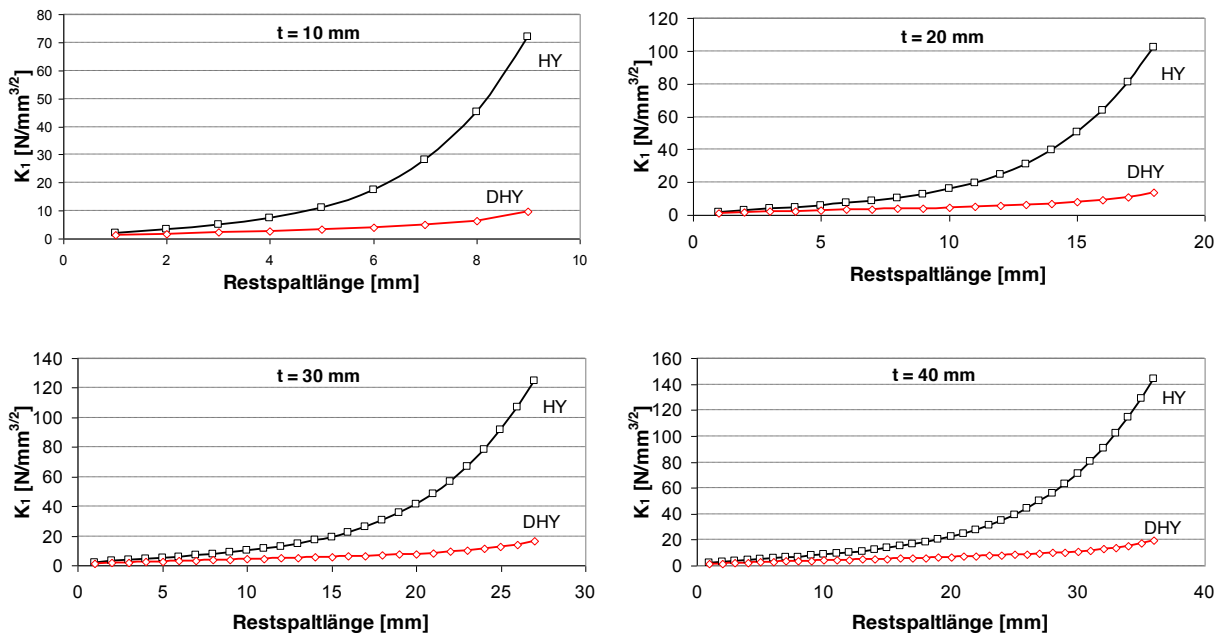


Bild 4-36 Vergleich DHY-/HY-Naht; t = 10 mm, t = 20 mm, t = 30 mm, t = 40 mm

4.4 Fazit

Zur Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren, die für die spätere Ableitung zulässiger Restspalte erforderlich waren, haben sich durch umfangreiche Untersuchungen am Detail Stumpfnaht Handrechenformeln als geeignet erwiesen.

Für beide Nahtgeometrien wurden vorhandene Funktionen aus der Literatur nach Murakami [30] verwendet, die mit numerisch ermittelten K-Werten gut übereinstimmen. Der Einfluss der Bauteilgeometrie (Schweißnahtüberhöhung) konnte vernachlässigt werden.

Der Einfluss weiterer im Bauteil vorliegender und bei zFP übersehener Defekte ist hier ebenfalls nicht maßgebend und wird durch die in EN 1993-1-10 [2] gestellten Anforderungen abgedeckt.

Als Ergebnis liegen somit die in der Parameterstudie ermittelten K-Faktoren vor, die im Folgenden in die Nachweisgleichung des Sprödbbruchkonzeptes einfließen, um die zulässigen Restspaltgrößen bestimmen zu können.

5 Rechnerische Ableitung zulässiger Restspalte für Stumpfstoßverbindungen

Die vorliegenden Untersuchungen ermöglichen die allgemeingültige Beschreibung des bruchmechanischen Verhaltens von Stumpfstoßverbindungen mit Restspalten in einem definierten Parameterbereich. Die allgemeinen Grundlagen zur Ableitung zulässiger Restspalte wurde bereits in [1] ausführlich erläutert. Es zeigte sich dort, dass die Voraussetzungen für den Grenzzustand Sprödbruch auch auf die Bewertung der restspaltbehafteten Bauteile übertragbar ist. Die grundlegende außergewöhnliche Bemessungssituation wird im Folgenden kurz wiedergegeben.

5.1 Bemessungssituation

5.1.1 Lastkombination

Es gilt die außergewöhnliche Lastkombination nach DAST-Richtlinie 009, obwohl der Restspalt planmäßig im Bauteil vorliegt und nicht die Folge eines bei der Inspektion versehentlich übersehenen Fehlers ist. Der Nachweis zur Vermeidung von Sprödbruch wird in der Tieflage des Zähigkeits-Temperaturdiagramms für einen vorliegenden Restpalt geführt, der konservativ als scharfer Anriss interpretiert wird. Als Leiteinwirkung der außergewöhnlichen Lastkombination wirkt der statistisch begründete Tiefstwert der Temperatur T_{Ed} . Dieser enthält folgende Effekte:

- T_{min} Extremwert der tiefsten Umgebungstemperatur mit einer statistischen Wiederkehrperiode von 50 Jahren, mit Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,8$ nach DIN EN 1990 [8]. Dies entspricht einer Versagenswahrscheinlichkeit von $p_F = 7 \cdot 10^{-5}$. Die Temperaturangaben für den Standort Deutschland sind in DIN EN 1991-1-5 [33] enthalten.
- ΔT_r Strahlungsverlust des Bauteils $\Delta T_r = -5$ K

Die Begleiteinwirkungen sind die zu Temperaturgrößen ungerechneten ständigen und veränderlichen Einwirkungen. Aus Gründen der Wahrscheinlichkeit wird angenommen, dass sie während der relativ kurzen Dauer der extremen Temperatureinwirkung keine Extremwerte annehmen:

- ΔT_σ Einfluss von $K^*_{appl,d}$ und somit Effekte aus:
 - σ_P : Primärspannungen aus äußeren Lasten, die sich im maßgebenden Querschnitt als Nennspannung aus einer elastischen Tragwerksberechnung ergibt. Die Lastfallkombination für die Ermittlung der Primärspannungen ist die häufige Kombination, s.u.
 - σ_S : Sekundärspannungen; hier: globale Eigenspannungen, wie sie z.B. aus Zwängungen durch den Einbau des betrachteten Bauteils infolge Fertigungstoleranzen entstehen können. In den Richtlinien ist ein pauschaler Wert $\sigma_S = 100$ MPa berücksichtigt.

Dieser Ansatz vom σ_S enthält keine lokalen Schweißeigenstressungen. Lokale Eigenstressungen werden durch den Sicherheitsterm ΔT_R , vgl. Gl. (2-12), berücksichtigt, der aus der statistischen Auswertung von Bauteilversuchen mit geschweißten Großproben abgeleitet worden.

- Detailgeometrie und –größe, Rissgeometrie und -größe
- Nennstressungen im Querschnitt der Rissinitiierung: $\sigma_{Ed} = \sigma_P + \sigma_S$

Erhöhte Dehnraten sowie plastische Verformungen sind ggf. zu berücksichtigen.

ΔT_ε Einfluss erhöhter Dehnraten

$\Delta T_{\varepsilon Cf}$ Einfluss von Kaltverformung

Die Begleiteinwirkungen (zugehörige Stressungen) werden für die häufige Lastkombination (statistische Wiederkehrperiode von 1 bis 3 Monaten) auf Gebrauchstauglichkeitsniveau nach den Vorgaben der DIN EN 1990 ermittelt:

$$\sigma_p = \sigma \{ \sum G_k \text{ „+“ } \psi_{1,1} \cdot Q_{k1} \text{ „+“ } \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{ki}$$

G_k charakteristische Einwirkungsgrößen aus den ständigen Lasten

Q_{k1} charakteristische Werte der führenden veränderlichen Einwirkung

Q_{ki} charakteristischen Werte der weiteren veränderlichen Einwirkungen

$\psi_{1,1}$ Kombinationsbeiwerte für veränderliche Lasten gemäß DIN EN 1990 [8] für

$\psi_{2,i}$ häufige und quasi-ständige Einwirkungen.

5.1.2 Beeinflussung der Tragsicherheit durch weitere Defekte

Neben dem Restspalt können weitere, unerkannte Defekte in der Schweißverbindung vorliegen. Die Auswirkungen von standardisierten halbelliptischen Oberflächenrissen wurden in Abschnitt 4.2.9 diskutiert. Es wurde dort gezeigt, dass bei Stumpfstoßverbindungen in der Regel der Restspalt die für den bruchmechanischen Sprödnachweis maßgebliche Ungeänge darstellt. Dennoch sollten folgende Nebenbedingungen immer erfüllt sein:

- Die zulässigen Restspaltlängen gelten immer unter der Voraussetzung, dass der Nachweis der Stahlgütewahl der Grundbleche nach [2] und [3] mindestens erfüllt ist.
- Gleichwohl der Restspalt die größere Kerbschärfe als der semi-elliptische Oberflächenriss besitzt, auch unter der Berücksichtigung dynamischer Beanspruchung und Risswachstum über den Bemessungsriss a_d hinaus, müssen erhöhte Anforderungen an die Oberflächenrissfreiheit gestellt werden. Es ist nicht auszuschließen, dass Restspalt und Oberflächenriss unter Ermüdungslast zusammenwachsen und somit einen kombinierten Seitenriss bilden, der hinsichtlich seiner bruchmechanischen Intensität als weitaus kritischer zu behandeln ist. DIN 18800-7 fordert für die Oberflächenrissfreiheit unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung, dass die Bewertungsgruppe B nach EN ISO 5817 eingehalten ist. Es wird empfohlen, den Umfang der Schweißnahtprüfung auf äußere Unregelmäßigkeiten hin zu erhöhen.

5.1.3 Inhomogenität der Materialzähigkeit über die Erzeugnisdicke

Bei Stumpfstoßverbindungen mit DHY-Schweißnaht liegt der Restspalt grundsätzlich in der Mitte der Schweißnaht bzw. in der Wärmeeinflusszone. Die Zähigkeitsabnahme ΔT_{27J} wird daher in der Mitte der Grundbleche nicht berücksichtigt, da Overmatching durch das Schweißgut stets vorausgesetzt wird.

5.2 Nachrechnung der Spröbruchversuche

Die Ergebnisse der Spröbruchversuche wurden in Abschnitt 3.3.6 zusammengestellt. In Analogie zu [1] wurden mit Hilfe des Spröbruchkonzepts sowohl die rechnerischen Versagenstemperaturen T_{calc} als auch die rechnerischen Versagensspannungen σ_{calc} berechnet. Diese wurden sowohl unter Berücksichtigung der gemessenen Materialwerte als auch für die in den Liefornormen geforderten Mindestwerte abgeleitet.

5.2.1 Vergleich der Versagenskenngrößen auf Basis gemessener Materialkennwerte für f_y und T_{27J}

Tabelle 5-1 gibt die Ergebnisse der rechnerischen Ermittlung der Versagenstemperaturen T_{calc} an. Die rechnerischen Versagenstemperaturen basieren auf den $K^*_{appl,d}$ -Werten, die mit Hilfe der Handrechenformeln nach Murakami, vgl. Gl. (4-2), bestimmt wurden. Die in den Zugversuchen ermittelten Bruchspannungen σ_{Exp} wurde für die Bruttoquerschnittswerte berechnet.

Tabelle 5-1 Ermittlung der rechnerischen Versagenstemperaturen T_{calc} auf Basis gemessener Materialeigenschaften f_y und T_{27J}

Versuch	σ_{Exp} [MPa]	$f_y(t;T)_{Exp}$ [MPa]	σ_{gy} [MPa]	L_R [-]	k_{R6} [-]	$K^*_{appl,d}$ [N/mm ^{3/2}]	ΔT_σ [°C]	T_{calc} [°C]
DHY-N1	425,9	488,6	-	-	-	-	-	-
DHY-N1-2	302,8	558,5						
DHY-N2	449,3	453,0	-	-	-	-	-	-
DHY-N2-2	221,2	544,4						
DHY-N4	477,4	498,8	-	-	-	-	-	-
DHY-N4-2	165,3	626,8						
DHY-N5	345,7	488,6	301,9	1,15	0,816	3653	-49,5	-22
DHY-N6-2	294,3	558,6						

Die weiteren in Tabelle 5-1 angegebenen Spröbruchparameter wurden wie folgt berechnet:

$f_y(T,t)_{Exp}$ Temperatur- und blechdickenabhängige Streckgrenze. Die durch die tiefe Temperatur erhöhte Streckgrenze wurde für die Versuchskörper nicht experimentell bestimmt. Sie wurde mit Hilfe einer Korrelationsformel nach Wallin, z.B. in [16], für die Versagenstemperatur berechnet, Gl. (5-1). Die Temperatur ist in Kelvin einzusetzen.

$$f_y(T, t) = f_{y,RT} + \frac{55555}{T} - 189 \quad (5-1)$$

σ_{gy} Grenzfließspannung im Querschnitt, in dem sich der Riss befindet, vgl. Abschnitt 2.3. σ_{gy} wird als die Spannung angenommen, die zum Erreichen der Streckgrenze des Restquerschnitts führt. Hier wurde als Restquerschnitt die Blechdicke abzüglich Restspalt angesetzt:

$$\sigma_{gy} = f_y(T, t) \cdot \left(1 - \frac{2a}{t}\right) \quad (5-2)$$

$$L_R = \sigma_{Exp} / \sigma_{gy}$$

$$k_{R6} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,5 \cdot L_R^2}} \quad \text{für } L_R < 1,0$$

$$k_{R6} = 0,816 \quad \text{für } L_R = 1,0$$

$K^*_{appl,d}$ berechnete Spannungsintensitätsfaktoren nach Gl. (4-2) infolge des ausgemessenen Restspaltes $2a$ und infolge der Bruchspannung σ_{Exp}

ΔT_σ aus $K^*_{appl,d}$ berechnetes Temperaturelement nach Gl. (2-13)

T_{calc} Rechnerische Versagenstemperatur; durch Gleichsetzen der Einwirkungen nach Gl. (2-12) und des Widerstandes nach Gl. (2-14) folgt:

$$T_{calc} = (T_{27J} - 18) + \Delta T_{27J} - \Delta T_\sigma - \Delta T_R$$

$$\text{mit } \Delta T_{27J} = 0 \text{ und } \Delta T_R = 0.$$

Die Gegenüberstellung der berechneten Versagenstemperaturen und der tatsächlich gemessenen Versagenstemperaturen in Bild 5-1a lässt jedoch noch keine eindeutige Korrelation erkennen, vgl. [1]. Bild 5-1 enthält zudem die Ergebnisse der Untersuchungen aus [1].

Aus diesem Grunde wurde in einem zweiten Schritt die theoretische Bruchspannung σ_{calc} so berechnet, dass die Nachweisgleichung des Grenzzustandes Sprödbbruch für die Versuchstemperatur T_{Exp} genau erfüllt ist. Der rechnerische Versagenszustand ist dann für $T_{Ed} [T_{Exp}, K^*_{appl,d}(\sigma_{calc})] = T_{Rd} [f_y(T, t)_{Exp}, T_{27J,Exp}]$ erreicht. In Tabelle 5-2 ist das Ergebnis für die theoretischen Versagensspannungen σ_{calc} infolge der gemessenen Versagentemperatur T_{Exp} angegeben und grafisch in Bild 5-1b aufbereitet. Eine Korrelation mit impliziten Sicherheiten ist jetzt gut erkennbar. Die ertragbaren Bruchspannungen σ_{Exp} der Bauteilproben liegen höher als diejenigen die theoretisch auf Basis des Sprödbbruchmodells ermittelt wurden.

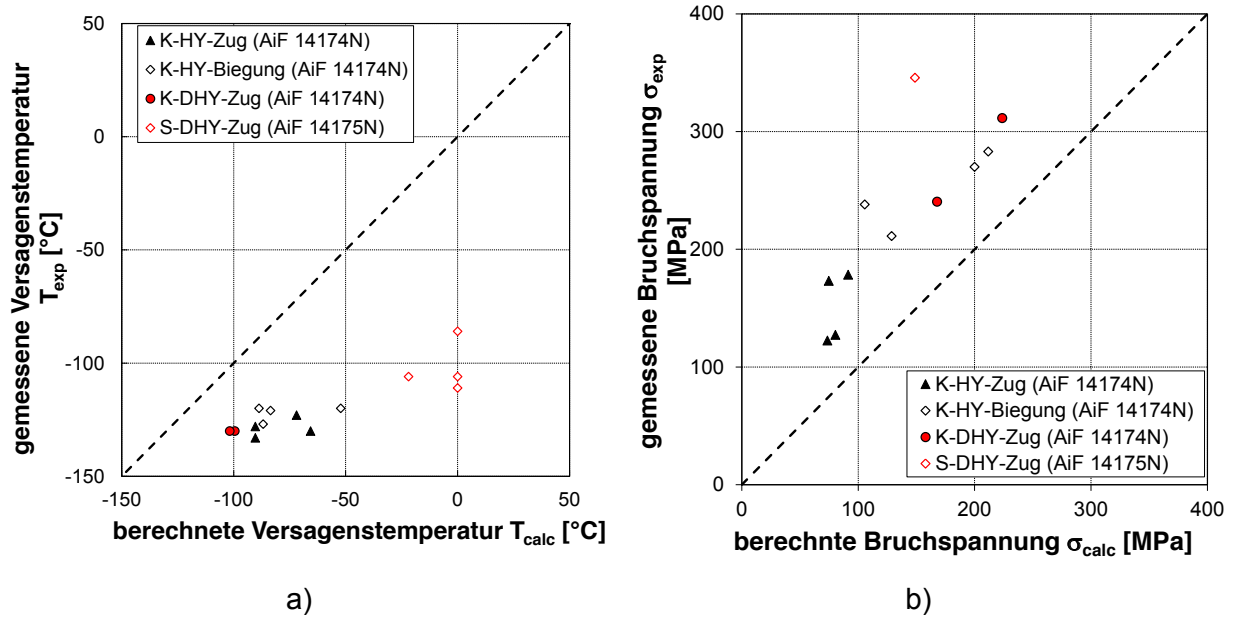


Bild 5-1 a) Vergleich der Versuchstemperaturen T_{Exp} mit den berechneten Versagenstemperaturen T_{calc} bzw. b) Vergleich der Versuchsspannungen σ_{Exp} mit den berechneten Versagensspannungen σ_{calc} auf Basis gemessener Materialkennwerte für f_y und T_{27J}

Tabelle 5-2 Ermittlung der rechnerischen Versagensspannung σ_{calc} auf Basis gemessener Materialeigenschaften f_y und T_{27J}

Versuch	T_{Exp} [°C]	$f_y(t;T)_{Exp}$ [MPa]	σ_{gy} [MPa]	L_R [-]	k_{R6} [-]	$K^*_{appl,d}$ [N/mm ^{3/2}]	ΔT_σ [°C]	σ_{calc} [°C]
DHY-N1	425,9	488,6	-	-	-	-	-	-
DHY-N1-2	302,8	558,5						
DHY-N2	449,3	453,0	-	-	-	-	-	-
DHY-N2-2	221,2	544,4						
DHY-N4	477,4	498,8	-	-	-	-	-	-
DHY-N4-2	165,3	626,8						
DHY-N5	345,7	488,6	301,9	0,49	0,94	1358,4	34,6	149
DHY-N6-2	294,3	558,6						

*) Ermüdungsrisswachstum vorwiegend an den Stirnflächen

5.2.2 Vergleich der Versagenskenngrößen auf Basis von Normwerten für f_y und T_{27J}

Sollen zulässige Restspaltgrößen auch bereits in der Planungsphase angewendet werden, liegen in der Regel noch keine genauen Materialkennwerte vor. Es muss daher auf die in den technischen Liefernormen garantierten Mindestwerte der Festigkeit und der Zähigkeit zurückgegriffen werden. Zur Abschätzung der Sicherheit gegen sprödes Versagen wurden die Versagenstemperaturen T_{calc} und Versagensspannungen σ_{calc} analog zu Abschnitt 5.2.1 mit

den Normenwerten $f_y = 345 \text{ MPa}$ und $T_{27J} = -20 \text{ °C}$ nach DIN EN 10025-2 bestimmt. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Bild 5-2 angegeben. In Teil a) des Bildes ist informativ die Gegenüberstellung der Versagenstemperaturen gezeigt. Beim Vergleich der Bruchspannungen in Teil b) des Bildes wird erneut die gute Korrelation deutlich, wobei infolge der besseren Schweißnahtqualität hier ein deutlich höherer Sicherheitsabstand zwischen den gemessenen und den berechneten Werten ersichtlich wird. Die Versagenszustände werden konservativer berechnet, da die den Liefornormen entnommene Materialwerte in den Bauteilproben deutlich bis sehr deutlich überschritten werden.

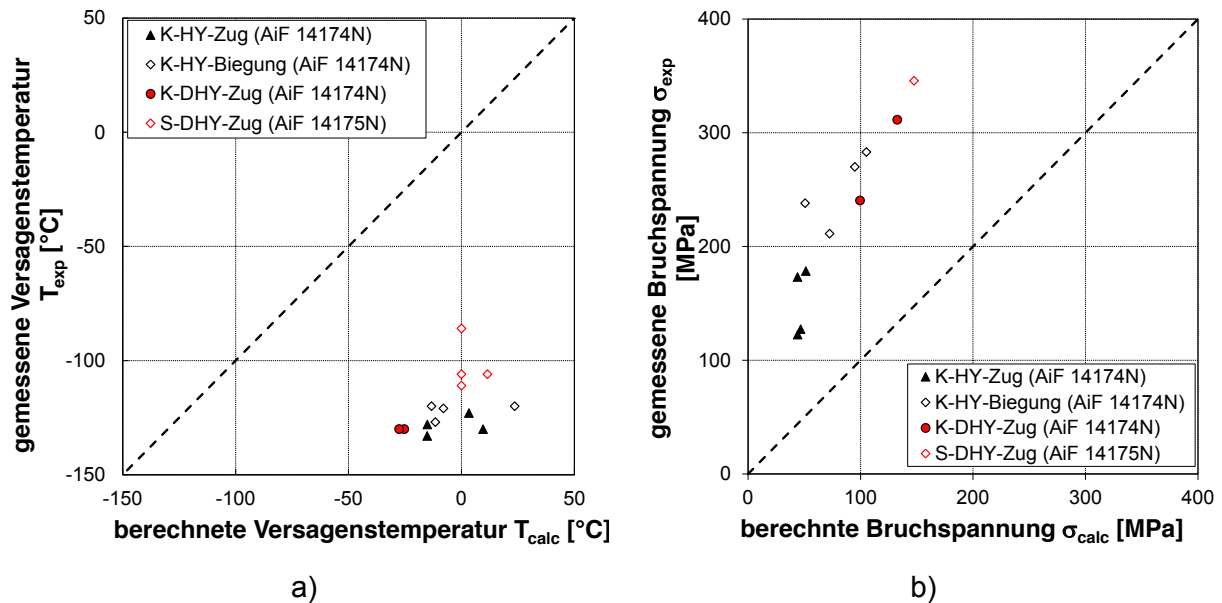


Bild 5-2 a) Vergleich der Versuchstemperaturen T_{Exp} mit den berechneten Versagenstemperaturen T_{calc} bzw. b) Vergleich der Versuchsspannungen σ_{Exp} mit den berechneten Versagensspannungen σ_{calc} auf Basis von Normwerten für f_y und T_{27J}

5.2.3 Schlussfolgerungen

Wie auch schon [1] in konnte mit Hilfe des Spröbruchkriteriums das Bruchverhalten in den Bauteilveruschen sicher beschrieben werden. Die auf der sicheren Seite liegende Korrelation der berechneten und der gemessenen Bruchspannung wird bei der Gegenüberstellung von Versuchswerten und theoretischen Rechenwerten deutlich.

5.3 Ableitung zulässiger Restspalte

5.3.1 Vorgehen

Auf Grundlage des in Abschnitt 2.3 beschriebenen Spröbruchkonzeptes und mit den vorangehenden Ergebnissen können nun die zulässigen Restspaltlängen für einen definierten Parameterbereich abgeleitet werden. Bei der DHY-Nahtverbindung wurden die zulässigen Restspalte für Blechdicken $t = 10 - 100 \text{ mm}$ ermittelt, für die HY-Naht wurden Bleche zwischen 10 mm und 40 mm Dicke untersucht.

Die Bestimmung der zulässigen Restspaltlängen erfolgte sowohl für vorwiegend ruhend als auch für nicht ruhend beanspruchte Bauteile.

Bei der statischen Berechnung der Restspalte für Stumpfstoße entspricht der zulässige Restspalt a_{stat} dem zulässigen, statischen Restspalt a_{stat} (zul $a_{\text{stat}} = \text{zul } a$).

Für Stumpfstoße, die einer nicht ruhenden Beanspruchung unterliegen wird eine Ermüdungsberechnung vorgenommen. Dabei wird der Risszuwachs Δa , der sich infolge der zyklischen Belastung $\Delta\sigma$ über eine Dauer von Lastzyklen N ausbildet, vom statisch ermittelten zulässigen Restspalt a_{stat} subtrahiert (zul $a_{\text{zykl}} = \text{zul } a_{\text{stat}} - \Delta a$). Die Ermittlung des Risszuwachses erfolgt nach dem Rissfortschrittsgesetz nach Paris [15], vgl. Gl. (2-5).

Die Ableitung des zulässigen Restspaltes wurde mit Hilfe des Sicherheitsnachweises gegen Sprödbruch geführt, s. Gl. (2-9). Im Folgenden werden die gewählten Parameter zur Bestimmung des zulässigen Restspaltes unter vorwiegend ruhender Beanspruchung dargestellt:

$K_{\text{appl,d}}(\sigma_{\text{Ed}})$	- für DHY-Nähte gemäß Gl. (2-2) mit Korrekturfunktion Y gemäß Gl. (4-2) nach Murakami [30] - für HY-Nähte gemäß Gl. (2-2) mit Korrekturfunktion Y gemäß Gl. (4-3) nach Murakami [30]
σ_{Ed}	$\sigma_{\text{P}} + \sigma_{\text{S}}$
σ_{P}	Primärspannung für die außergewöhnliche Lastfallkombination; $\sigma_{\text{P}} = 0,25 \cdot f_y(t)$, $\sigma_{\text{P}} = 0,5 \cdot f_y(t)$ und $\sigma_{\text{P}} = 0,75 \cdot f_y(t)$ mit $f_y(t) = f_{y,\text{nom}} - 0,25t$
σ_{S}	$\sigma_{\text{S}} = 100 \text{ MPa}$
T_{min}	Extremwert der tiefsten Umgebungstemperatur: -30 °C für Außenbauteile bzw. 0 °C für Innenbauteile
ΔT_{r}	Strahlungsverlust des Bauteils -5 K (bereits in T_{min} berücksichtigt)
ΔT_{R}	Sicherheitselement: 0 K
b_{eff}	Länge der Rissfront: 2 x Stumpfstoßbreite B für DHY-Naht bzw. für HY-Naht
$\Delta T_{\text{εcf}}, \Delta T_{\text{ε}}$	Temperaturverschiebung durch den Einfluss einer Kaltverformung bzw. höherer Dehnraten: 0 K
$T_{27\text{J}}$	- Gütegruppe JR: +20 °C; - Gütegruppe J0: 0 °C; - Gütegruppe J2: -20 °C;
$\Delta T_{27\text{J}}$	Einfluss der Inhomogenität der Materialzähigkeit über die Erzeugnisdicke: $\Delta T_{27\text{J}} = 0 \text{ K}$

Zur Ermittlung des zulässigen zyklischen Restspaltes wurde folgende Ermüdungsparameter verwendet:

zul. a_{zykl}	= zul. $a_{\text{stat}} - \Delta a$
Δa	aus Rissfortschrittsberechnung nach Paris $\Delta a = \Sigma da$ für $N = \Sigma dN$ (Anzahl der Lastspiele: hier $2 \cdot 10^6$)
ΔK	nach Gl. (2-2)
$\Delta \sigma$	Spannungsschwingbreite gemäß DIN EN 1993-1-9 [11] Kerbfall Wurzelriss 36*
C, m	$C = 1,8 \cdot 10^{-13}$, $m = 3$ gemäß [16]

5.3.2 Berechnungsbeispiel

Im Folgenden wird beispielhaft das Berechnungsverfahren zur Ermittlung des zulässigen Restspaltes unter vorwiegend ruhender Beanspruchung für eine Stumpfstoßverbindung mit DHY-Naht und mit einer Dicke $t = 10$ mm dargestellt. Die Stumpfstoßbreite beträgt 200 mm.

Berechnungsannahmen:

- Gütegruppe S355J2
- Lastniveau $\sigma_p = 0,25 \cdot f_y(t)$
- außenliegendes Bauteil.

In Tabelle 5-3 wird beispielhaft für die Restspaltgrößen $2a_{\text{stat}} = 8$ mm und $2a_{\text{stat}} = 9$ mm die Ergebnisse folgender Berechnungsschritte dargestellt.

1. Bruchmechanische Beanspruchung $K_{\text{appl,d}}$
2. Ermittlung der Bemessungstemperatur T_{Ed} nach Gl. (2-12)
3. Ermittlung von T_{Rd} nach Gl. (2-14)
4. Sprödbbruchnachweis $T_{\text{Ed}} \geq T_{\text{Rd}}$

Für die genaue Ermittlung der einzelnen Parameter wird auf Kap. 2.3 verwiesen.

Als Ergebnis liegt die zulässige Restspaltgröße $2a_{\text{stat}} = 8$ mm vor, bei der der Sprödbbruchnachweis gerade noch erfüllt wird.

Tabelle 5-3 Ermittlung der bruchmechanischen Beanspruchung $K_{\text{appl,d}}$

		$2a_{\text{stat}} = 8 \text{ mm}$	$2a_{\text{stat}} = 9 \text{ mm}$
$K_1(\sigma_S)$	$[\text{N}/\text{mm}^{3/2}]$	643	969
$K_1(\sigma_P)$	$[\text{N}/\text{mm}^{3/2}]$	571	860
$K_{1,\text{ges}}$	$[\text{N}/\text{mm}^{3/2}]$	1214	1829
	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	38,4	57,8
$f_y(t)$	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	353	353
σ_{gy}	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	71	35
L_r	[-]	1,26	2,52
ψ	[-]	1,42	2,84
ρ_1	[-]	0,11	0,16
ρ	[-]	0	0
k_{R6}	[-]	0,75	0,49
$K_{\text{appl,d}}$	$[\text{N}/\text{mm}^{3/2}]$	1625	3734
	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	51,4	118,1
b_{eff}	[mm]	400	400
ΔT_σ	[K]	14,7	-50,9
T_{27J}	[K]	-20	-20
ΔT_{27J}	[K]	0	0
ΔT_R	[K]	0	0
T_{min}	[°C]	-25	-25
ΔT_r	[K]	-5	-5
ΔT_ε	[K]	0	0
ΔT_{ecf}	[K]	0	0
T_{Ed}	[°C]	-15	-81
T_{Rd}	[°C]	-38	-38
$T_{\text{Ed}} \geq T_{\text{Rd}}$		unkritisch	kritisch

5.3.3 Zulässige Restspalte für Stumpfstoße mit DHY-Schweißnaht

Für Stumpfstoßverbindungen mit DHY-Schweißnaht wurden zulässige Restspalte für statische Beanspruchung als auch Ermüdungsbeanspruchung ermittelt. Die Ableitung der zulässigen Restspalte erfolgte für:

- Stahlsorte S355,
- Stahlgütegruppe JR, J0 und J2,
- Lastniveau $\sigma_P = 0,25 \cdot f_y(t)$, $\sigma_P = 0,50 \cdot f_y(t)$ und $\sigma_P = 0,75 \cdot f_y(t)$,

- Einsatztemperatur $T_{\min} = -30 \text{ °C}$ und $T_{\min} = 0 \text{ °C}$,
- Breite der Stumpfstoßverbindung $B = 100 \text{ mm}$, $B = 200 \text{ mm}$, $B = 300 \text{ mm}$ und $B = 1000 \text{ mm}$,
- Blechdicke der Stumpfstoßverbindung $t = 10 - 100 \text{ mm}$.

Zur Ermittlung des zulässigen Restspaltes unter nicht ruhender Beanspruchung wurde der Risszuwachs Δa zunächst für die Ausgangswerte $\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$ (Kerfallklasse 36*; Wurzelriss gemäß EN 1993-1-9 und $N = 2 \cdot 10^6$ und die Werkstoffparameter C und m von dem statischen Restspalt subtrahiert.

Die Ergebnisse sind graphisch in Anhang D aufbereitet.

5.3.3.1 Vorwiegend ruhende Beanspruchung

Bild D-1 in Anhang D.1 zeigt für variierende Lastniveaus den Einfluss der Einsatztemperatur für eine 200 mm breite Stumpfstoßverbindung der Stahlgüte S355J2.

- Mit zunehmender Blechdicke t wächst die zulässige Restspaltlänge.
- Mit zunehmendem Lastniveau σ_P nehmen die zulässigen Restspaltlängen ab.
- Innenliegende Bauteile erfahren eine geringere Temperaturbeanspruchung. Dementsprechend können größere Restspalte ertragen werden als in Außenbauteilen.

Bild D-2 in Anhang D.1 zeigt für variierende Lastniveaus den Einfluss der Breite B der Stumpfstoßverbindungen für die Einsatztemperatur $T_{\min} = -30 \text{ °C}$ der Stahlgüte S355J2. Bei der Ableitung der zulässigen Restspalte wurde die Breite der Stumpfstoßverbindung über die effektive Rissfrontlänge b_{eff} berücksichtigt.

- Mit zunehmender Stumpfstoßbreite B nehmen die zulässigen Restspalte ab.

Bild D-3 in Anhang D.1 zeigt für variierende Lastniveaus den Einfluss der Stahlgüte für eine 200 mm breite Stumpfstoßverbindung für die Einsatztemperatur $T_{\min} = -30 \text{ °C}$.

- Eine Verschlechterung der Gütegruppe führt erwartungsgemäß zu geringeren zulässigen Restspaltgrößen.

5.3.3.2 Nicht ruhende Beanspruchung

Bild D-4 in Anhang D.2 zeigt für variierende Lastniveaus die zulässigen Restspaltlängen a_{zyk} für Ermüdungsbeanspruchung für $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel für 200 mm breite Stumpfstoßverbindungen der Stahlgüte S355 J2 bei einer Einsatztemperatur von $T_{\min} = -30 \text{ °C}$.

- Erwartungsgemäß sind die zulässigen Restspaltlängen für Ermüdungsbeanspruchungen geringer als unter statischer Ruhelast.
- Weiterhin ist ein großer Einfluss des Materialparameters C auf die zulässigen Restspaltlängen zu erkennen.
- Die Unterschiede hinsichtlich der zulässigen Restspaltlängen infolge der nach IIW-Richtlinie ($5,21 \cdot 10^{-13}$) bzw. nach Barsom ($2,20 \cdot 10^{-13}$) empfohlenen Werkstoffparameter C im Vergleich zu den Eurocode-Empfehlungen ($1,80 \cdot 10^{-13}$) betragen ca. 40 % und ca. 60 %.

- Eine repräsentative Untersuchung des Werkstoffparameters C für moderne Baustähle wäre sinnvoll.

5.3.4 Zulässige Restspalte für Stumpfstoße mit HY-Schweißnaht

Das Untersuchungsfeld entspricht den Ausführungen gemäß Abschnitt 5.3.3. Die Blechdicken für HY-Naht-Verbindungen wurden fertigungstechnisch auf $t = 10 - 40$ mm beschränkt.

5.3.4.1 Vorwiegend ruhende Beanspruchung

Bild D-5 in Anhang D.3 zeigt für variierende Lastniveaus den Einfluss der Einsatztemperatur für eine 200 mm breite Stumpfstoßverbindung der Stahlgüte S355J2.

- Im Vergleich zur Schweißvariante mit DHY-Naht sind die zulässigen Restspalte für HY-Nähte aufgrund der Asymmetrie sehr viel kleiner.

Ebenso wie bei der DHY-Nahtverbindung führen hier folgende Faktoren zu einer Abminderung des zulässigen Restspaltes zu a_{stat} , vgl. Bild D-5, Bild D-6 und Bild D-7.

- Erhöhung des Lastniveaus,
- Niedrigere Lufttemperatur,
- Zunehmende Breite der Stumpfstoßverbindung,
- Abminderung der Gütegruppe.

5.3.4.2 Nicht ruhende Beanspruchung

Bild D-8 in Anhang D.4 zeigt für variierende Lastniveaus die zulässigen Restspaltlängen zu a_{zyk} für Ermüdungsbeanspruchung für $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel für 200 mm breite Stumpfstoßverbindungen der Stahlgüte S355 J2 bei einer Einsatztemperatur von $T_{min} = -30$ °C.

- Erwartungsgemäß sind die zulässigen Restspaltlängen für Ermüdungsbeanspruchungen je nach Wahl des Werkstoffparameters C um ca. 50 – 70 % geringer als unter statischer Ruhelast.

5.4 Schlussfolgerungen

Die bereits schon in [1] bereitgestellten Werkzeuge zur Ermittlung zulässiger Restspalte konnten auf Stumpfstoßverbindungen übertragen werden. Die in diesem Bericht dargestellten Diagramme (Anhang D) sind Beispiele für mögliche praxisübliche Parameterkombinationen, die ein einfaches Ablesen des zulässigen Restspaltes für vorwiegend ruhende, aber auch für Ermüdungsbeanspruchung, sowie für Außen- und Innenteile erlauben. Darüberhinaus erlaubt die Methode prinzipiell die zulässige Restspaltgröße für jedes Bemessungsszenario. Wichtige Erkenntnisse sind:

- In den untersuchten Bemessungsszenarien mit Stumpfstoßverbindungen für DHY- und HY-Nähte sind Restspalte tolerierbar.
- Bei symmetrischen Nahtformen (DHY) sind die zulässigen Restspaltlängen wesentlich höher als bei antimetrischer Nahtform (HY).

- Durch Vorgabe einer geeigneten Stahlgütewahl können Restspaltgrößen gezielt gesteuert werden. So weist ein J2-Stahl per Definition eine höhere Mindestzähigkeit auf als ein JR-Stahl, so dass für den zäheren J2-Stahl größere Restspalte zulässig sind.
- Es ist zu beachten, dass im Bemessungsfall Sprödbruch die außergewöhnliche Lastfallkombination zugrunde gelegt wird. Demnach werden die begleitenden Beanspruchungen nicht für das Extremlastniveau auf Tragfähigkeitsebene bestimmt, sondern auf Gebrauchsniveau. Als Eingangswerte für die Diagramme in Anhang D, die für $\sigma_{Ed} = 0,25 \cdot f_y(t)$, $\sigma_{Ed} = 0,50 \cdot f_y(t)$ und $\sigma_{Ed} = 0,75 \cdot f_y(t)$ erstellt worden sind, ist demnach auch die häufige Lastkombination zu verwenden. In Brückenbauwerken beispielsweise liegen die Erwartungswerte der Spannungen auf Gebrauchstauglichkeitsniveau zwischen $\sigma_{Ed} = 0,25 \cdot f_y(t)$ und $\sigma_{Ed} = 0,67 \cdot f_y(t)$

6 Restspaltdetektion

Zur Detektierung von Unregelmäßigkeiten an Schweißverbindungen können verschiedene zerstörungsfreie Prüfmethoden verwendet werden. In der Praxis werden Durchstrahlungs (RT)- oder Ultraschallprüfungen (UT) vorgenommen. Bei HV- oder DHV-Verbindungen ist eine ungenügende Durchschweißung eine typische Ungänze, die beispielsweise mittels Ultraschallprüfung gefunden werden kann. Im jüngst abgeschlossenen AiF-Forschungsvorhaben 14174 N wurden moderne Ultraschallprüfmethode hinsichtlich der Größenbestimmung von Restspalten an diesen Schweißverbindungen untersucht, da mit herkömmlichen UT-Prüfmethode bisher keine quantitativ hinreichende Bestimmung der Restspaltgröße möglich war. Eine Umsetzung in technische Regeln ist ein wichtiges Ziel dieser Bestrebungen.

Das ergänzende Forschungsvorhaben AiF 14175 N soll weitere Informationen zur Genauigkeit der Ultraschallprüfung liefern, welche als Basis für bruchmechanische Betrachtungen oder Konzepte der Betriebsfestigkeit dienen. Hierin stellt die Prüfung von Stumpfstößen eine Erweiterung zum abgeschlossenen Vorhaben 14174 N dar, in dem T-Stoß- und Kreuzstoßverbindungen geprüft wurden. Im Schwerpunkt der Untersuchungen lag die Phased-Array-Methode, die zur Restspaltdetektion herangezogen und verifiziert wurde.

6.1 Allgemeines

In geschweißten Konstruktionen werden häufig Vollanschlüsse, also eine vollständige Durchschweißung der angeschlossenen Grundwerkstoffe, geplant. Auf Basis des internationalen Regelwerkes DIN EN ISO 5817 wird diese Forderung häufig in Verträgen verankert. Mittels zerstörungsfreier Prüfung, wie beispielsweise Ultraschallprüfung, wird untersucht, ob ein Restspalt vorliegt, Bild 6-1. In diesem Fall werden Vollanschlüsse oft durch kostenintensive Reparaturen nachträglich hergestellt.

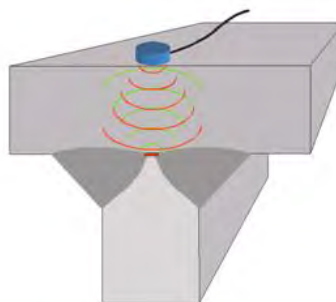


Bild 6-1 Detektion eines Restspaltes mittels Ultraschallprüfung

Die zusätzliche Wärmeeinbringung bei der Reparaturschweißung kann sich negativ auf den Grundwerkstoff auswirken und weitere Schweißspannungen verursachen. Dynamisch beanspruchte Schweißkonstruktionen mit Restspalten zeigten in Bauteilversuchen eine Rissentstehung von der Bauteiloberfläche ausgehend, Bild 6-2. Die Spannungen an der Bauteiloberfläche erwiesen sich demnach oft als kritischer als eine Spannungskonzentration an

einem vorhandenen Restspalt, der oft direkt in oder nahe an der spannungsneutralen Zone liegt.

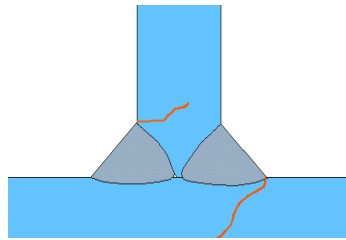


Bild 6-2 Rissentstehung an der Bauteiloberfläche bei dynamischer Beanspruchung

Eine Berechnung von mit Restspalten behafteten Schweißkonstruktionen mit Methoden der Bruchmechanik oder Betriebsfestigkeit ist jedoch auf Basis der klassischen Ultraschallprüfung nicht möglich, da diese die reale Größe eines Restspaltes nicht liefert. Die klassische Ultraschalltechnik nutzt die Echohöhe eines Reflektors als Parameter für dessen Zulässigkeit. Die Koppelbedingung, die wesentlich durch die Oberflächenstruktur des Prüfstückes beeinflusst wird, hat neben der Größe des Reflektors einen entscheidenden Einfluss auf die Echohöhe. Die Angabe der realen Restspaltgröße ist daher mit der klassischen Ultraschallprüfung nicht möglich. Das Prüfergebnis ist lediglich ein Vergleich der Reflexionseigenschaften eines Reflektors mit denen eines künstlichen Reflektors, wie einer Flachbodenbohrung oder Querbohrung, Bild 6-3. Das Prüfergebnis muss genau formuliert heißen: „der gefundene Restspalt reflektiert den Schall wie eine Flachbodenbohrung mit x mm Durchmesser.“ Als Basis für eine Berechnung mittels Bruchmechanik oder Betriebsfestigkeit ist solch ein Prüfergebnis unbrauchbar.

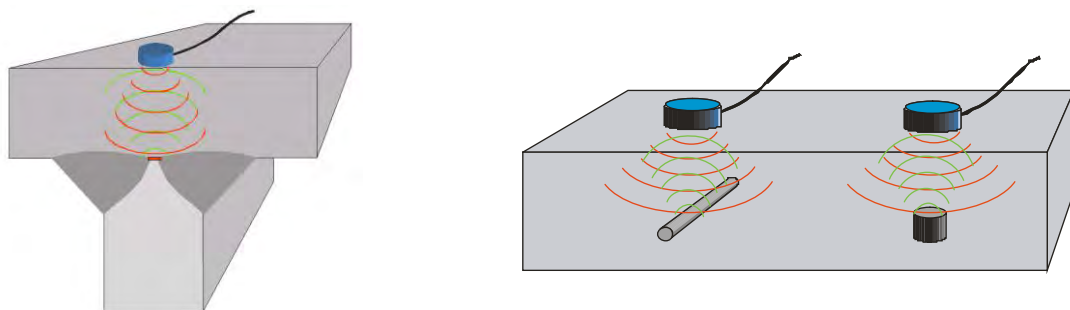


Bild 6-3 Vergleich der Ultraschall-Reflexion eines Restspaltes mit künstlichen Reflektoren (Querbohrung bzw. Kreisscheibenreflektor)

6.2 Ultraschallverfahren zur Restspaltmessung

6.2.1 Klassische Ultraschallmessungen auf Basis von Randwellen

Ein praxistaugliches Prüfverfahren zur Ermittlung der realen Größe von Restspalten ist Ziel der hier beschriebenen Arbeiten. Eine solche quantitative Prüfaussage kann die Auswertung sogenannter Randwellen liefern. Randwellen entstehen an scharf begrenzten Ungängen, wie den betrachteten Restspalten, Bild 6-4.

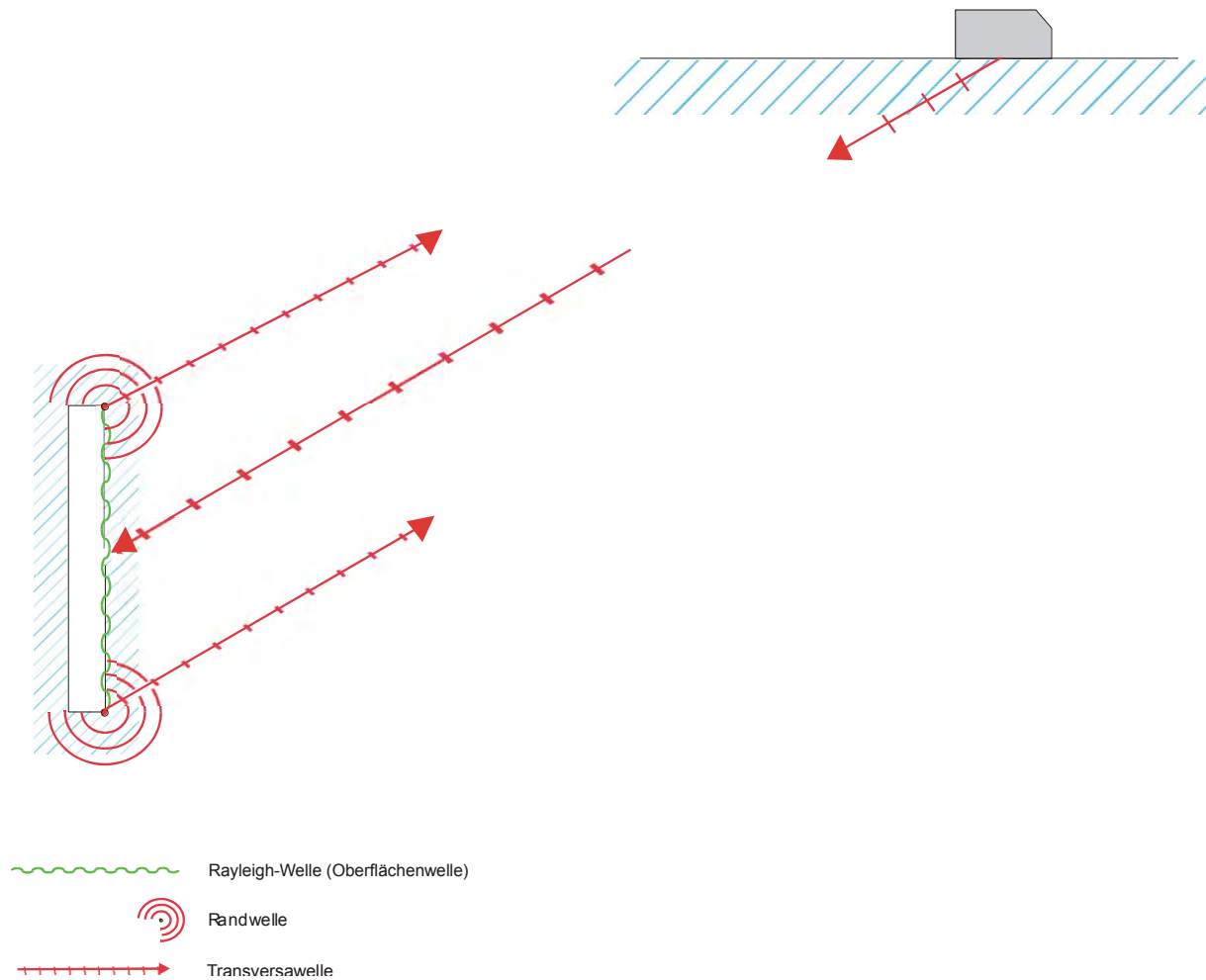


Bild 6-4 Entstehung von Randwellen durch einfallende Schallwelle

Die in Bild 6-4 gezeigten Randwellen weisen wenig Richtcharakteristik auf und können vom Prüfkopf empfangen werden. Die Schallwege der Randwellen zum Prüfkopf sind unterschiedlich lang. Digitale Ultraschallgeräte ermöglichen eine genaue Ermittlung der Schallwege, Bild 6-5.

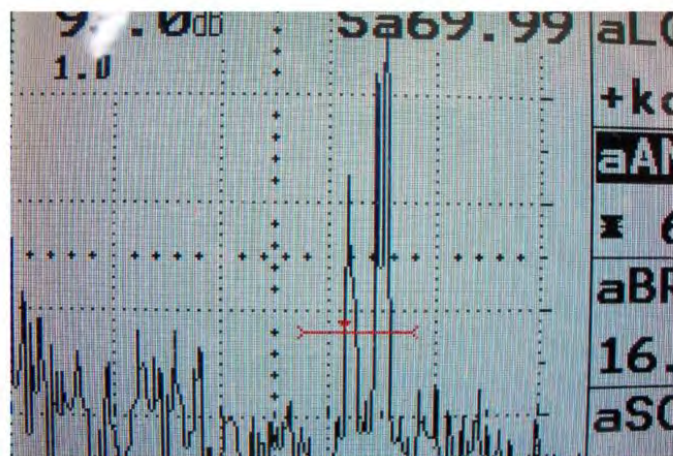


Bild 6-5 Randwellenechos auf dem Bildschirm eines digitalen Ultraschallgerätes

Die Schallwegdifferenz der beiden Randwellen korreliert eindeutig mit der Restspaltgröße. Ein Rückrechnen der Schallwege der Randwellen in die Tiefenlagen der aussendenden Reflektoren ist über trigonometrische Funktionen möglich. Die Differenz der Tiefenlagen entspricht der Größe des angeschallten Restspaltes. Für die Laufzeitdifferenz ΔS gilt Gl. (6-1):

$$\Delta S = \frac{\frac{d+x}{2} - \frac{d-x}{2}}{\cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{a}{\frac{d+x}{2}} \right) \right] - \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{a}{\frac{d-x}{2}} \right) \right]} \quad (6-1)$$

mit

- a: Projektionsabstand
- d: Dicke des Grundmaterials
- S1, S2: Schallwege der Randwellen
- ΔS : Schallwegdifferenz = Restspaltgröße
- α : Einschallwinkel

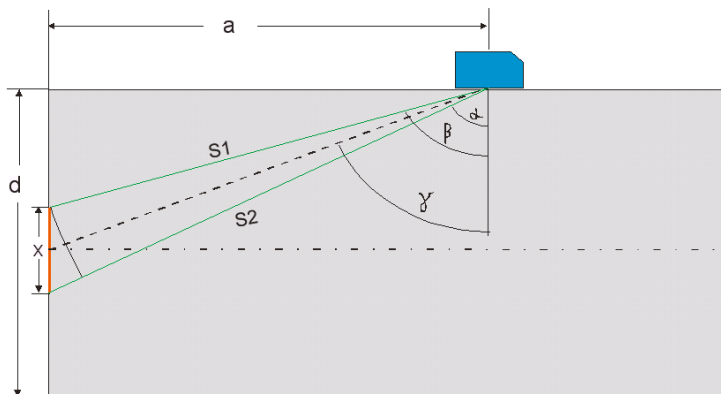


Bild 6-6 Geometrische Verhältnisse bei der Reflexion von Randwellen an einem Restspalt mit der Größe x

Die Restspaltgröße x lässt sich durch Iteration oder mit Hilfe der geometrischen Darstellung der Funktion $\Delta S(a,x)$ ermitteln.

Die Arbeit mit dem A-Bild-Gerät (Bild 6-5) ist mit einem rechnerischen Aufwand verbunden. Die Echos der Randwellen sind zudem schwach und wiesen einen geringen Signal-Rausch-Abstand auf.

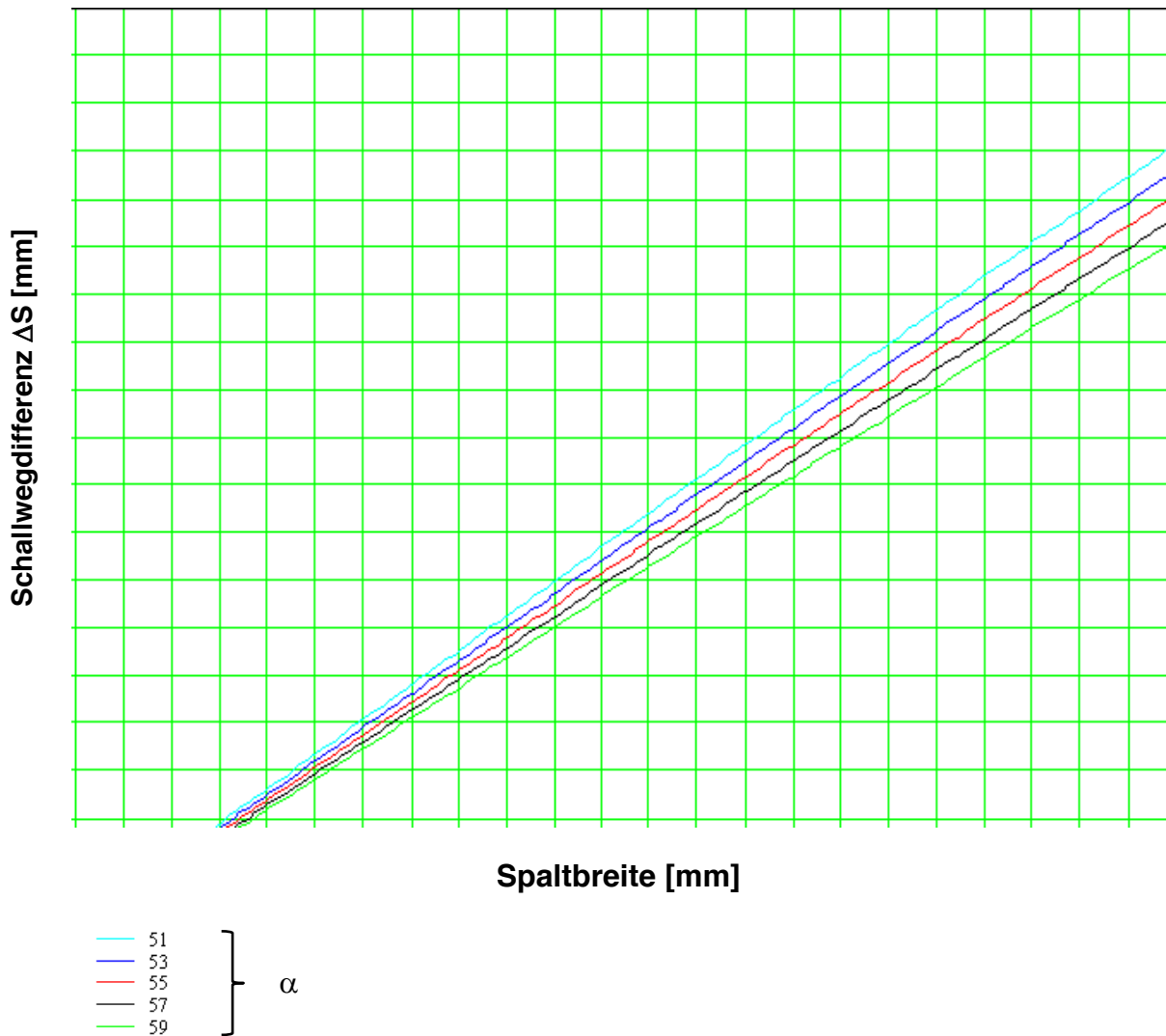


Bild 6-7 Ermittlung der Restspaltgröße mittels grafischer Darstellung $\Delta S(a,x)$. Die verschiedenenartigen Linien kennzeichnen unterschiedliche Projektionsabstände, siehe Bild 6-6.

6.2.2 Phased-Array-Verfahren

Die Gruppenstrahlertechnik (Phased Array) bietet deutliche Vereinfachungen bei der Auswertung von Randwellenechos. Die Gruppenstrahlertechnik wird seit etwa 50 Jahren in der Medizin genutzt und findet seit einigen Jahren vermehrt Anwendung in der Materialprüfung. Die Gerätekosten wurden von den Herstellern deutlich reduziert. Die bildliche Darstellung der Prüfergebnisse ist eine Dokumentation der Prüfergebnisse, die mit dem Kunden diskutiert werden kann. Der Phased Array-Prüfkopf beinhaltet eine Vielzahl von Einzelschwingern, die getrennt angesteuert werden können Bild 6-8a. Durch phasenversetztes Ansteuern der Einzelschwinger ist es möglich, das Schallbündel unter einem bestimmten Winkel in das Bauteil einzuleiten.

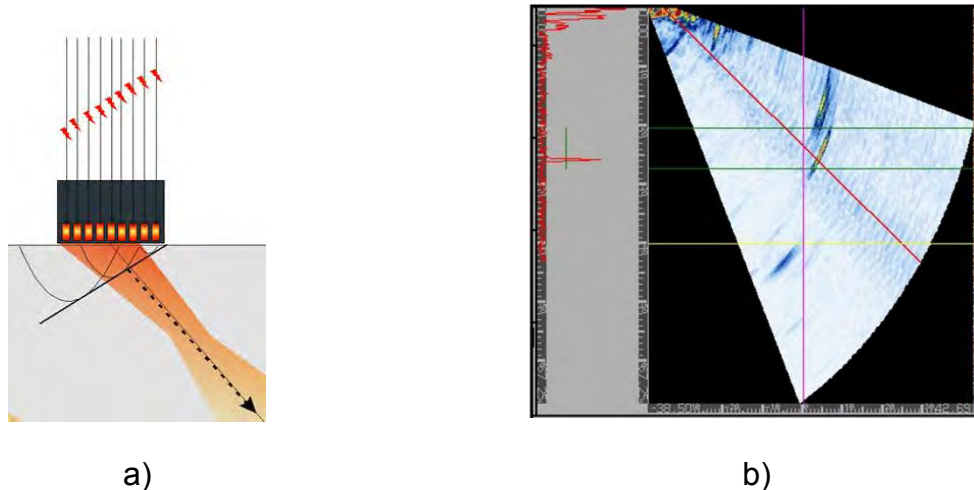


Bild 6-8 (a) Winkelschallung mittels Gruppenstrahlerprüfkopf (Phased Array), (b) Sektorscan eines Phased-Array-Gerätes

Die kontinuierliche, periodische Änderung des Phasenversatzes ermöglicht das Schwenken des Schallbündels. Die Darstellung auf dem Bildschirm wird als „Sektorscan“ bezeichnet, Bild 6-8b. Im linken Bildschirmbereich wird zusätzlich das A-Bild (Amplitude, Schallweg) des aktuell ausgewerteten Einschallwinkels angezeigt. Der aktuell ausgewertete Einschallwinkel wird als rote Linie, dem sogenannten „Beam“, gekennzeichnet.

Bild 6-9 zeigt den Sektorscan bei der Ermittlung der Restspaltgröße an einer DHV-Schweißverbindung.

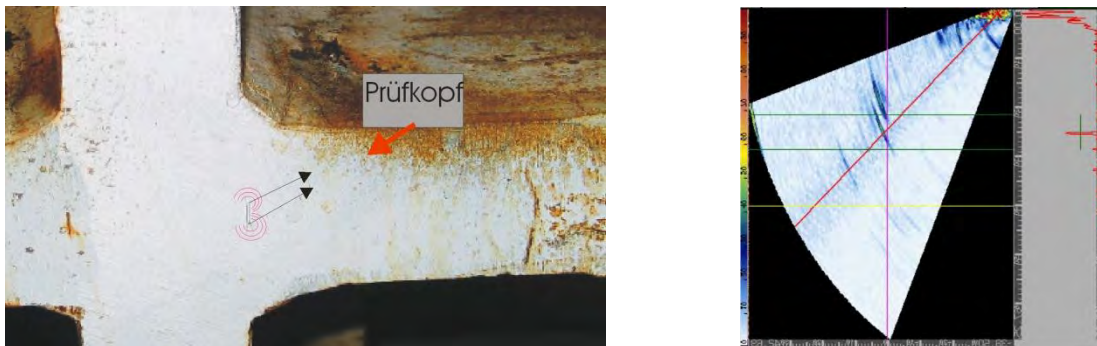


Bild 6-9 Sektorscan zur Restspaltermittlung an einer DHV-Schweißverbindung

Im Sektorscan liegen die Anzeigen der Randwellen exakt übereinander. Die Tiefenlage dieser beiden Reflektoren wird direkt vom Gerät angezeigt, wenn der Beam (rote Linie) über das Maximum der Anzeige geschwenkt wird. Die Differenz der Tiefenlagen ist die zu ermittelnde Restspaltgröße.

6.3 UT-Vermessung der Restspalte

Die vorliegenden Probekörper wurden an der RWTH Aachen von der SLV Duisburg einer Ultraschallprüfung unterzogen, sh. Bild 6-10.



Bild 6-10 UT-Messung durch die SLV Duisburg

Die Probekörper wurden in ein über die Breite gehendes 20-mm-Raster eingeteilt. Entsprechend wurden an diesem Raster die Messwerte aufgenommen. Von Pos. 1 wurde an den Kreuzstoßverbindungen der rechte, von Pos. 2 der linke Restspalt gemessen. An den Stumpfstoßverbindungen wurden die UT-Messungen von zwei Seiten (Pos. 1: Messung von der Spaltseite und Pos 2. Messung von der angefasten Seite) durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Prüfung zu gewährleisten, vgl. Bild 6-11. Als Koppelmittel wurde einfacher Kleister eingesetzt.

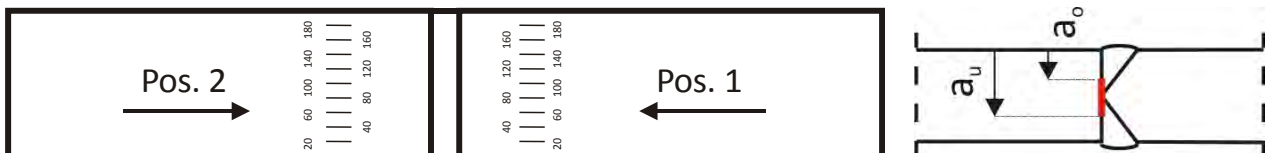


Bild 6-11 Definition der Einschallrichtung sowie der Restspaltposition

Die Prüfung von Stumpfstoßen stellt eine Erweiterung zum abgeschlossenen Vorhaben 14174 N dar, in dem T-Stoß- und Kreuzstoßverbindungen geprüft wurden.

6.3.1 Messergebnisse an Kreuzstoßverbindungen

Die Ultraschallprüfung von Kreuzstoßverbindungen lieferte klare Randwellenechos, wie in Bild 6-12 dargestellt. Der Beam wurde jeweils auf das Maximum der Anzeige geschwenkt

und der Wert DA (Tiefenlage der Anzeige) notiert. Die Messwerte der Ultraschallprüfungen an Kreuzstoßverbindungen sind in 0 zusammengestellt.

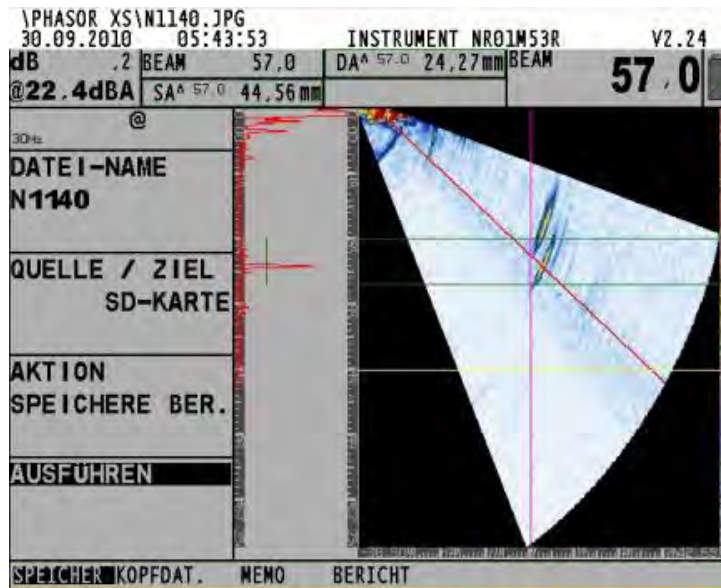


Bild 6-12 Randwellenechos der Kreuzstoßverbindungen

6.3.2 Messergebnisse an Stumpfstoßverbindungen

Die Messungen an den Kreuzstoßverbindungen lieferten eindeutige Ergebnisse. Dahingegen erwies sich die Ultraschallmessung an den Stumpfstoßverbindungen hinsichtlich der Anzeigeninterpretation als problematischer.

Die Ultraschallprüfungen an den Stumpfstoßverbindungen lieferten neben deutlichen Randwellenechos auch Echoanzeigen, die nicht ausschließlich durch Randwellen verursacht sein können, Bild 6-13.

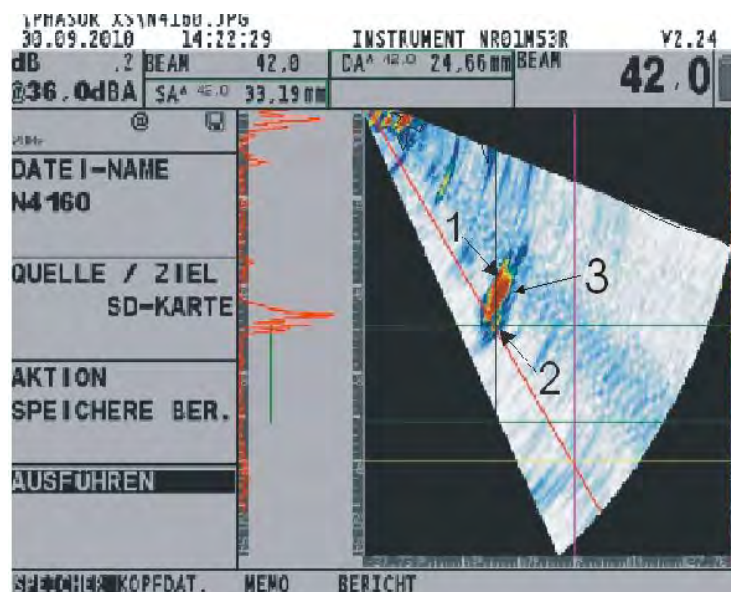


Bild 6-13 Randwellenechos 1 und 2 neben einem weiteren Echo (3) mit ungeklärter Ursache

Die in Bild 6-13 gezeigten Echoanzeigen lassen eine Auswertung der Randwellen noch zu. In weiterführenden Untersuchungen wurde das Schallfeld eines 16-Elemente Prüfkopfes auf unterschiedliche Schallwege fokussiert. Hiermit konnte eine deutlichere Differenzierung der beiden Randwellenechos erreicht werden.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Messwerte bei unterschiedlichen Einschallpositionen einer Schwankung unterworfen sind. So ergibt sich beispielsweise bei der Probe mit der Kennzeichnung DHY-N4 50° ein Messwert von 6,88 mm bei einer axialen Einschallposition von 20 mm aus der Einschallrichtung, die mit Pos. 1 gekennzeichnet ist. Bei der gleichen axialen Einschallposition von 20 mm beträgt der Messwert aus der entgegengesetzten Einschallrichtung (Pos. 2) 4,01 mm. Im abgeschlossenen AiF-Forschungsvorhaben 14174 N sind derartige Schwankungen ebenfalls beobachtet worden. Die metallografischen Schlitze liefern eine Erklärung der beobachteten Schwankungen. Die unterschiedlichen Einschallpositionen (Pos. 1 und Pos. 2) führen zu unterschiedlichen Reflexionsstellen für die Randwellen und damit auch zu unterschiedlichen Messwerten, Bild 6-14.

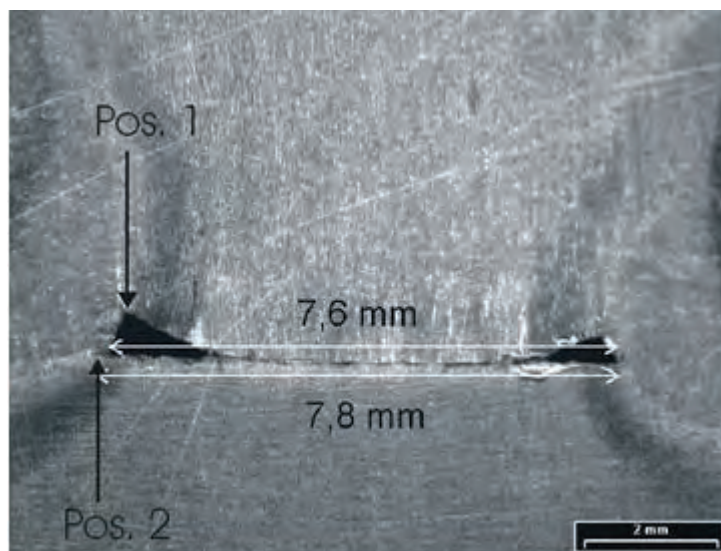


Bild 6-14 Unterschiedliche Reflexionsstellen eines Restspaltes bei unterschiedlichen Einschallpositionen (Pos. 1 bzw. Pos. 2) in einem Schliffbild veranschaulicht

Bild 6-15 zeigt für die Restspaltposition und die Restspaltgröße der Stumpfstoßverbindungen die Abweichungen in Form der Differenz b_i der gemessenen Größen aus Position 1 und Position 2. Weiterhin sind Mittelwert und die Standardabweichung vom Mittelwert angegeben. Für die Restspaltgröße $2a$ ergibt sich in Abhängigkeit der Einschallposition eine Standardabweichung in Höhe von $\sigma = 1,43$ mm.

Es ist festzustellen, dass die Einschallposition (Pos.1: Messung von der Spaltseite oder Pos. 2: Messung von der angefasten Seite) maßgeblich das Messergebnis beeinflusst. Bei der Restspaltlängenmessung sind je nach Einschallseite relativ große Abweichungen von bis zu 4 mm festzustellen. Auch bezüglich der Lage des Restspaltes im Blech treten Differenzen von bis zu 4,4 mm auf. Im Hinblick auf das Sicherheitskonzept zur Beurteilung restspaltbehafteter Bauteile muss hier Klarheit durch Ausmessen der Bruchflächen bzw. der wahren Restspaltlängen geschaffen werden. Weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der vorzuziehenden Einschallpositionsvariante werden weiter von der SLV Duisburg untersucht.

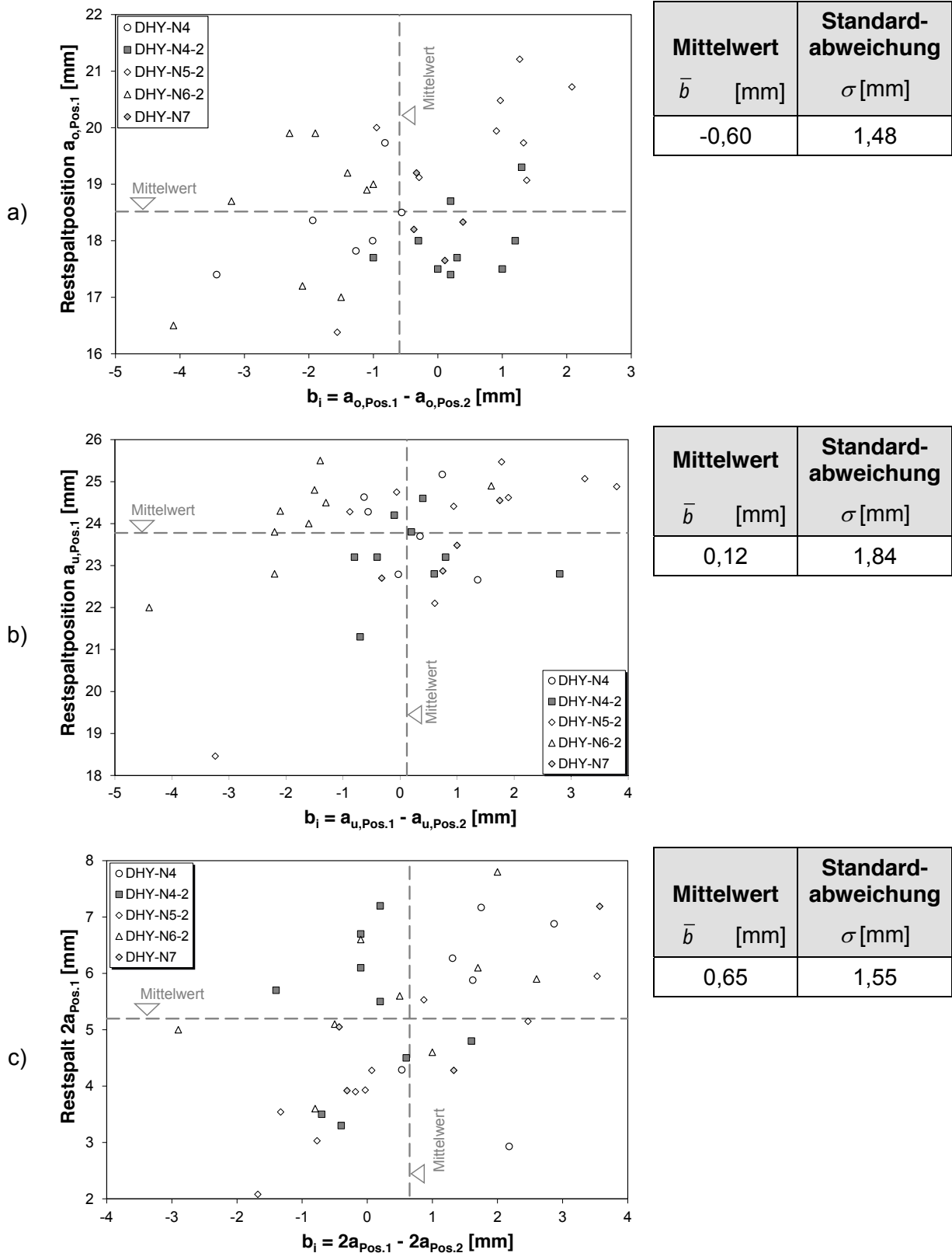


Bild 6-15 UT-Messungen in Abhängigkeit der Einschallposition für Stumpfstoßverbindungen: a) Restspaltposition a_o , b) Restspaltposition a_u , c) Restspaltgröße $2a$

6.3.3 Zusammenstellung der Messergebnisse

Eine Übersicht der über die Breite gemittelten Restspaltposition $a_{o,u}$ sowie der Restspaltgröße $2a = a_o - a_u$ ist in Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 gegeben. Die gemessenen Restspaltlängen $2a$ liegen in etwa zwischen 4 und 8,5 mm. Es ist festzustellen, dass mehr oder weniger große Streuungen über die Probenbreite für die Restspaltpositionen und die Restspaltgrößen auftreten. Insbesondere bei der Probe DHY-N7 sind größere Schwankungen zu verzeichnen. Die genauen Ergebnisse können Anhang E entnommen werden.

Tabelle 6-1 Ergebnis der Ultraschallmessungen (über die Probenbreite gemittelte Werte); Kreuzstöße

Probekörper		a_o [mm]	a_u [mm]	$2a$ [mm]
DHY-N1	Pos. 1	17,75	24,25	6,49
	Pos. 2	18,36	24,61	6,25
DHY-N1-2	Pos. 1	19,28	24,10	4,82
	Pos. 2	20,69	23,90	3,21
DHY-N2	Pos. 1	17,85	24,36	6,51
	Pos. 2	17,79	24,34	7,54
DHY-N2-2	Pos. 1	18,81	23,40	4,59
	Pos. 2	18,93	24,09	5,16
DHY-N3	Pos. 1	17,17	24,12	6,95
	Pos. 2	19,23	24,41	5,17
DHY-N3-2	Pos. 1	18,41	23,66	5,25
	Pos. 2	19,36	23,46	4,09

Tabelle 6-2 Ergebnis der Ultraschallmessungen (über die Probenbreite gemittelte Werte); Stumpfstöße

Probekörper		a_o [mm]	a_u [mm]	$2a$ [mm]
DHY-N4	Pos. 1	18,59	23,97	5,38
	Pos. 2	19,81	23,67	3,86
DHY-N4-2	Pos. 1	17,98	23,23	5,26
	Pos. 2	17,66	22,92	5,27
DHY-N5	Pos. 1	17,86	23,86	6,00
	Pos. 2	-	-	-
DHY-N5-2	Pos. 1	19,63	23,78	4,15
	Pos. 2	19,06	22,88	3,83
DHY-N6	Pos. 1	18,48	24,45	5,97
	Pos. 2	-	-	-
DHY-N6-2	Pos. 1	18,48	24,07	5,59
	Pos. 2	20,54	25,74	5,20
DHY-N7-2	Pos. 1	18,28	23,62	5,34
	Pos. 2	17,62	23,68	6,06

6.4 Vergleich der aus den UT-Messungen und den Bruchflächen ermittelten Restspaltlängen

Es erfolgt zunächst eine getrennte Betrachtung der Restspaltlängen in Abhängigkeit der Messverfahren, die im Vorgängerprojekt AiF 14174 N (herkömmliche Messungen basierend auf Randwellen, jedoch mit modifizierten Prüfköpfen) und im Projekt AiF 14175 N (Phased Array) zur Restspaltmessung verwendet wurden. Ziel der vergleichenden Untersuchungen zwischen tatsächlichen und gemessenen Restspaltlängen ist die Ableitung eines Vorhaltemaßes Δ . Dieses Vorhaltemaß Δ dient als additives Sicherheitselement, mit dem die gemessenen Restspaltgrößen in einer realen Beurteilungs- bzw. Bemessungssituation beaufschlagt werden müssen.

6.4.1 Herkömmliche UT-Messungen mit modifizierten Schallköpfen

Die im Vorgängerprojekt untersuchten Schweißverbindungen mit HY-Naht und DHY-Naht wurden mit modifizierten Prüfköpfen mit Randwellen vermessen. Im Abschlussbericht AiF 14174 N [1] sind hierzu detaillierte Erläuterungen zu finden. Es wurde dort festgestellt, dass die UT-Messungen der einseitig geschweißten Nähte die tatsächlich vorliegenden Restspaltgeometrien um ca. 1-3 mm bei Verbindungen ohne Luftspalt und um ca. 2-4 mm bei Verbindungen mit Luftspalt unterschätzen. Bei den DHY-Nähten stimmten die Messergebnisse mit den tatsächlichen Restspaltlängen besser überein. Die wahren Restspalte lagen ca. 1-2 mm höher als die gemessenen Restspalte.

Zur Ableitung eines Vorhaltemaßes Δ wurden die vorliegenden Daten zunächst getrennt jeweils für HY-Nähte und für DHY-Nähte, und dann zusammen statistisch ausgewertet. Dazu wurden zunächst die Abweichungen b_i als Differenz der gemessenen und der tatsächlichen Restspaltlängen nach Gl. (6-2) berechnet.

$$b_i = a_{i,UT} - a_{i,Ist} \quad (6-2)$$

mit

$a_{i,UT}$: mit Ultraschall gemessene Restspaltlänge in [mm]

$a_{i,Ist}$: tatsächliche Restspaltlänge auf Grundlage der Bruchflächenanalyse in [mm]

Bild 6-16 zeigt, dass die so ermittelten Abweichungen b_i einer Normalverteilung unterliegen. Der Mittelwert b_{gem} der Abweichungen und die zugehörige Standardabweichung s betragen:

- $b_{gem} = 3,3 \text{ mm}$
- $s = 1,8 \text{ mm}$.

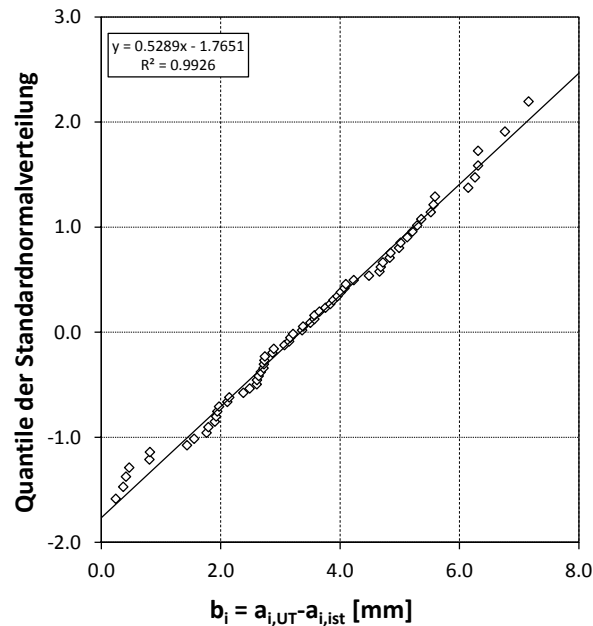


Bild 6-16 Darstellung der Normalverteilung der Abweichungen der gemessenen und der tatsächlichen Restspaltlängen der HY-Schweißnähte auf Wahrscheinlichkeitspapier

Die weitere statistische Auswertung erfolgt in Anlehnung an das Vorgehen in DIN EN 1990, Anhang D [8]. Das Vorhaltemaß Δ wird als 5 %-Quantil $b_{0,05}$ gemäß Gl. (6-3) bestimmt.

$$b_{0,05} = b_{gem} + k_n \cdot s \quad (6-3)$$

mit

k_n : gemäß Tabelle D.1 aus DIN EN 1990 [8]

Die Auswertung für die HY-Nähte ist in Bild 6-17a dargestellt und das 5 %-Quantil beträgt $b_{0,05} = 6,3$ mm.

Die statistische Auswertung der DHY-Nähte (18 Messwerte) erfolgte analog und ergab folgende Parameter:

- $b_{gem} = -0,3$ mm
- $s = 1,5$ mm
- $b_{0,05} = 2,3$ mm.

Aufgrund der großen Streubreite der Ergebnisse führt die damit einhergehende Standardabweichung in diesem Fall zu einem vergleichsweise großem 5 %-Fraktilewert von 2,3 mm, insbesondere deshalb, da die auf der sicheren Seite liegenden Messwerte relativ stark von den wahren Restspaltgrößen abweichen, Bild 6-17b. Eine Vernachlässigung dieser auf der sicheren Seite liegenden Werte führt zu einer Verringerung der Streuung. Für den Mittelwert, die Standardabweichung und das 5 %-Fraktile würden sich Werte von $b_{gem} = 0,4$ mm, $s = 0,4$ mm und $b_{0,05} = 1,2$ mm ergeben.

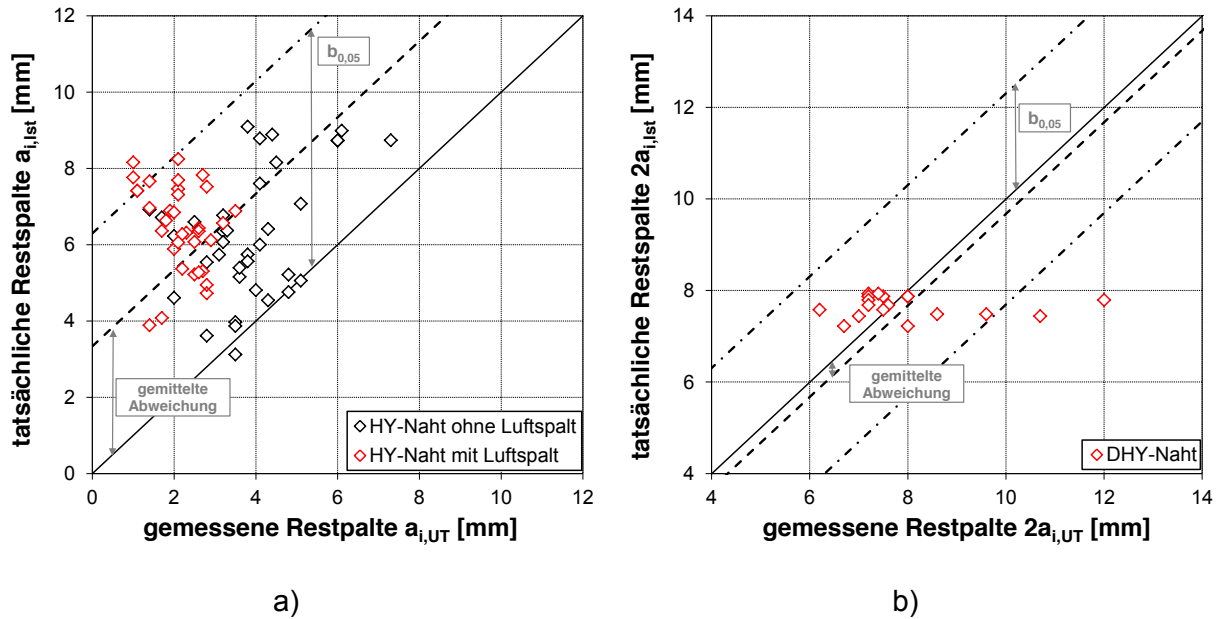


Bild 6-17 Gegenüberstellung der mit herkömmlichen Ultraschallverfahren (aber mit modifizierten Schallköpfen) gemessenen und der aus der Analyse der Bruchfläche bestimmten Restspaltgrößen für a) HY-Schweißverbindungen und b) DHY-Schweißnähte

6.4.2 Ultraschallmessungen mit der Phased-Array-Methode

An denjenigen im Versuch entlang der Restspalte spröde gebrochenen Probekörpern wurden die wahren Restspaltgrößen durch Auswertung der Bruchflächen unter dem Mikroskop bestimmt. Des Weiteren wurden die Proben DHY-N3-2 und DHY-N5-2 von der SLV Duisburg in Scheiben geschnitten und die wahren Restspaltgrößen durch Magnetpulverprüfung bestimmt. Tabelle 6-3 ordnet die beiden angewendeten Verfahren den entsprechenden Proben zu. Für die in Tabelle 6-3 nicht aufgeführten Proben (DHY-N1, DHY-N2, DHY-N6) war eine aufgrund der Versagensform „Zähbruch“ zuverlässige Bestimmung der Restspaltgrößen auch nach mechanischer Bearbeitung der Bruchflächen nicht möglich.

Tabelle 6-3 Ergebnis der Ultraschallmessungen (über die Probenbreite gemittelte Werte); Stumpfstoße

Probekörper	Bauteil	Verfahren zur Bestimmung der wahren Restspaltgröße	Anzahl der Messwerte
DHY-N1-2	Kreuzstoß	Mikroskopische Bruchflächenanalyse	9
DHY-N2-2	Kreuzstoß	Mikroskopische Bruchflächenanalyse	9
DHY-N3-2	Kreuzstoß	Magnetpulverprüfung (MT)	18
DHY-N4	Stumpfstoß	Mikroskopische Bruchflächenanalyse	15
DHY-N4-2	Stumpfstoß	Mikroskopische Bruchflächenanalyse	18
DHY-N5	Stumpfstoß	Mikroskopische Bruchflächenanalyse	9
DHY-N5-2	Stumpfstoß	Magnetpulverprüfung (MT)	9
DHY-N6-2	Stumpfstoß	Mikroskopische Bruchflächenanalyse	18

6.4.2.1 Auswertung der Bruchflächen

Bild 6-18 zeigt die Gegenüberstellung der mittels Ultraschall und der durch Auswertung der Bruchflächen ermittelten Restspaltgrößen für die Kreuzstoßproben. Im Vergleich zu den Messungen mit herkömmlichen UT-Verfahren wird ein deutlich schmaleres Streuband deutlich, vgl. 6.4.1. Die wahren Restspaltgrößen werden im Mittel um $b_{\text{gem}} = 0,47 \text{ mm}$ unterschätzt. Aus Anhang E können die zahlenmäßigen Daten der Restspaltgrößen entnommen werden.

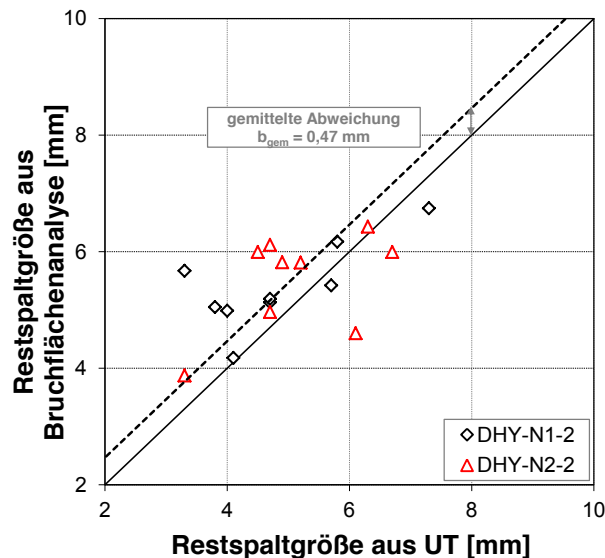


Bild 6-18 Vergleich der mit Ultraschall gemessenen und der mittels mikroskopischer Bruchflächenanalyse bestimmten Restspaltgrößen der Kreuzstoßproben

Bild 6-19 zeigt ähnlich gute Ergebnisse für die Messungen an den Stumpfstoßproben. Die Messungen mit Einschallwinkel von der Spaltseite (Pos. 1, Bild 6-19a) zeigen eine etwas bessere Korrelation der Datenwerte als die Messungen von der angefasten Seite (Pos. 2, Bild 6-19b). Die Unterschiede sind aber nur marginal, so dass eine Empfehlung für eine bevorzugte Einschallrichtung bei Stumpfstoßproben nicht ausgesprochen werden kann.

Die mittlere Abweichung der Phased-Array-Messungen vom wahren Wert beträgt für die Schallposition Pos. 1:

- $b_{\text{gem,Pos.1}} = 0,43 \text{ mm}$,

für die Schallposition Pos. 2 beträgt die mittlere Abweichung

- $b_{\text{gem,Pos.2}} = 0,67 \text{ mm}$.

Bevor die statistische Auswertung aller gemessenen Wertepaare in Analogie zu Abschnitt 6.4.1 durchgeführt wird, erfolgt die Gegenüberstellung der an der SLV Duisburg aufgeschnittenen Proben mit Ermittlung der Restspaltgrößen mit Hilfe des Magnetpulververfahrens.

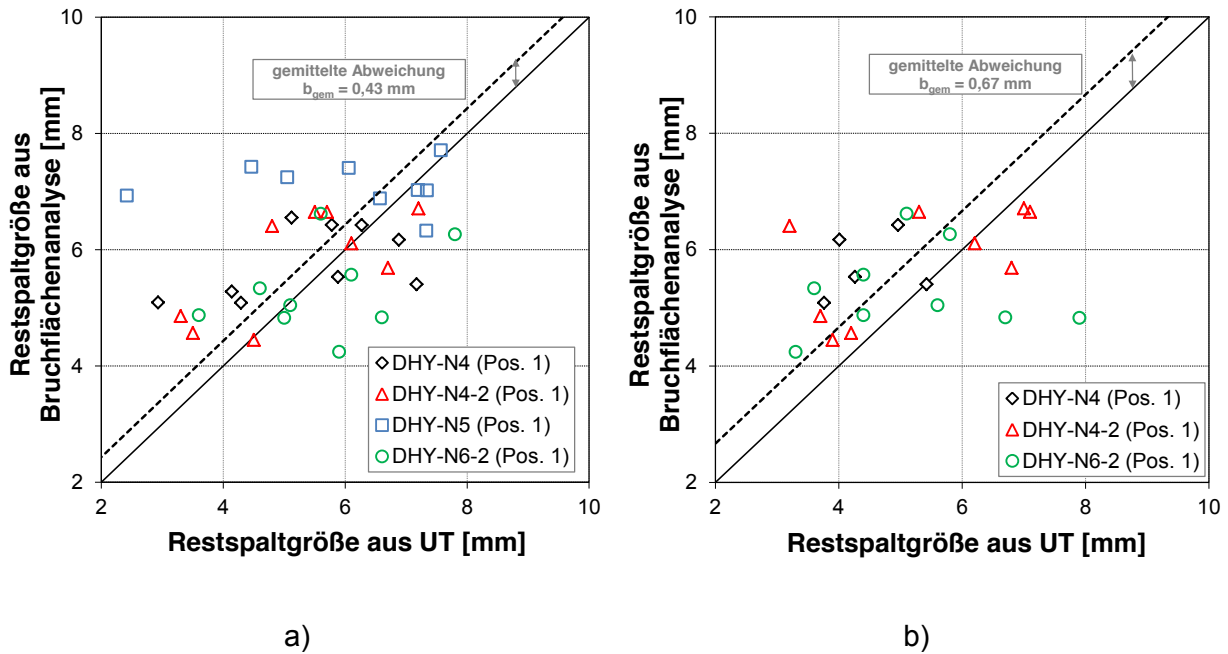


Bild 6-19 Vergleich der mit Ultraschall gemessenen und der mittels mikroskopischer Bruchflächenanalyse bestimmten Restspaltgrößen der Stumpfstoßproben; a) von der Spaltseite Pos. 1 gemessen und b) von der angefasten Seite Pos. 2 gemessen

6.4.2.2 Vergleich mit MT-Messungen

Die Kreuzstoßprobe DHY-N3-2 und die Stumpfstoßprobe DHY-N5-2 wurden nach der UT-Vermessung an der RWTH Aachen zur SLV Duisburg geliefert und dort in 20 mm breite Scheiben geschnitten, so dass die Bestimmung der Restspaltgrößen über die Querschnittsbreite mittels Magnetpulverprüfung (MT) ermöglicht wurde. Das Ergebnis der MT-Prüfung im Vergleich zur UT-Prüfung kann Anhang E sowie Bild 6-20 entnommen werden.

Bild 6-20a zeigt, dass die Messwerte der Magnetpulverprüfung für die Kreuzstoßverbindung im Mittel um $b_{\text{gem}} = 1,52$ mm von den mit Phased-Array gemessenen Restspaltgrößen abweichen. Für die Stumpfstoßverbindung wurden mittlere Abweichungen von $b_{\text{gem}} = 2,34$ mm ermittelt, Bild 6-20b. Dies entspricht einer Unterschätzung der wahren Restspaltgrößen von 20 – 40 %.

Eine Differenzierung in Abhängigkeit der Einschallposition bei den Stumpfstoßverbindungen führt auch bei der Auswertung der Spallängen mit Magnetpulververfahren zu größeren Abweichungen, wenn von Pos. 2 von der angefasten Seite geschallt wird, vgl. Abschnitt 6.4.2.1. Die mittleren Abweichungen für die Pos. 1 und Pos. 2 sind im Folgenden aufgeführt, aufgrund einer klaren Darstellung jedoch nicht in Bild 6-20 übernommen worden.

- $b_{\text{gem,Pos.1}} = 2,18$ mm
- $b_{\text{gem,Pos.2}} = 2,51$ mm

Hinsichtlich der Ableitung eines Vorhaltemaßes Δ , mit der die auf der unsicheren Seite liegenden UT-Messungen beaufschlagt werden sollen, ist die Datenerfassung getrennt nach Einschallposition 1 und Einschallposition 2 nicht weiter relevant.

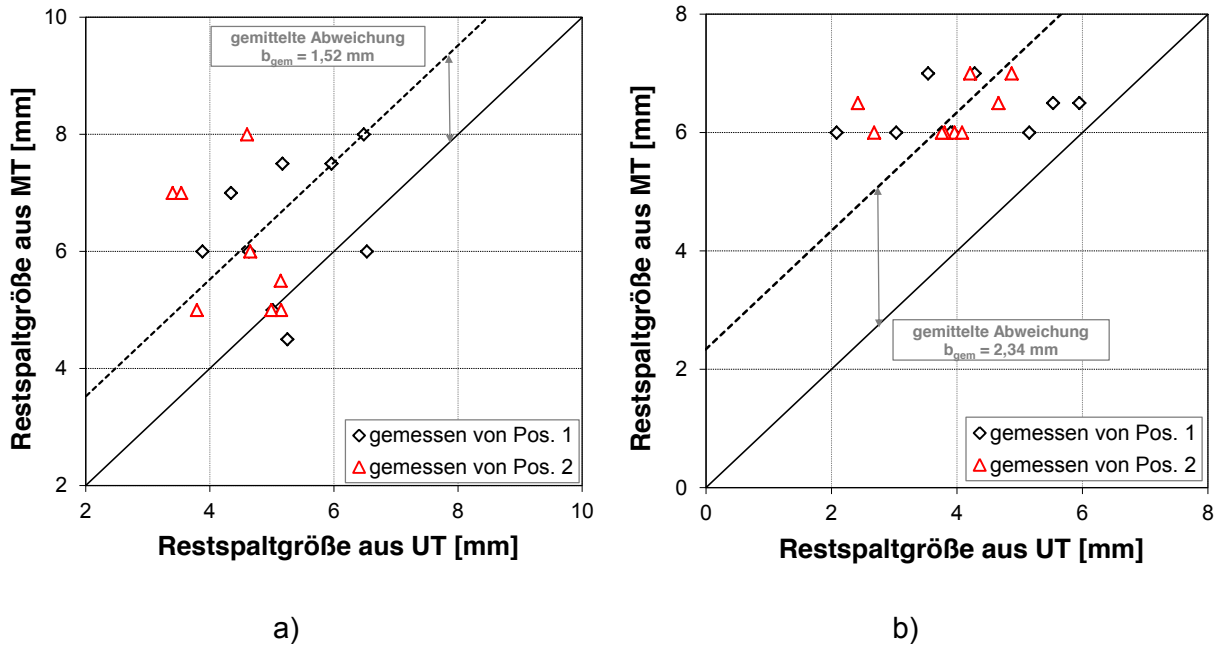


Bild 6-20 Vergleich der mit Ultraschall gemessenen und den mittels Magnetpulverprüfung bestimmten Restspaltgrößen der a) Kreuzstoßprobe DHY-N3-2 und der b) Stumpfstoßprobe DHY-N5-2

6.4.2.3 Ableitung eines für die Ultraschallmessung notwendigen Vorhaltemaßes Δ

Analog zum Vorgehen in Abschnitt 6.4.1 wird die Normalverteilung der Differenzbeträge b_i aus den Messwerten der Ultraschallmessung und den tatsächlichen Restspaltgrößen überprüft. Für die Ist-Werte der Restspaltgrößen wurden sowohl die Ergebnisse aus der metallographischen Bruchflächenanalyse (Abschnitt 6.4.2.1) und die Ergebnisse der Magnetpulverprüfung herangezogen (Abschnitt 6.4.2.2). Es zeigt sich, dass die ermittelten Abweichungen einer Normalverteilung unterliegen, Bild 6-21.

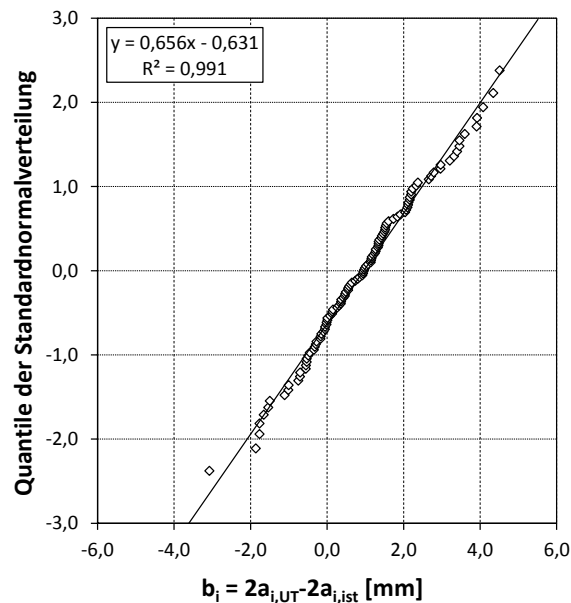


Bild 6-21 Normalverteilung der Abweichungen der gemessenen und der tatsächlichen Restspaltlängen der DHY-Schweißnähte auf Wahrscheinlichkeitspapier

Zunächst erfolgt die statistische Auswertung für alle Messwerte einschließlich der Daten aus Bruchflächenanalyse und MT-Prüfung. Der Mittelwert der Abweichungen b_{gem} und die zugehörige Standardabweichung s nehmen dann die folgenden Beträge an:

- $b_{\text{gem}} = 0,96 \text{ mm}$
- $s = 1,47 \text{ mm}$

Die statistische Auswertung in Anlehnung an das Vorgehen in DIN EN 1990, Anhang D ergibt ein 5 %-Quantil nach Gl. (6-3) in Höhe von

- $b_{0,05} = 3,38 \text{ mm}$.

Diese Auswertung ist in Bild 6-22a dargestellt. Werden die Messergebnisse der MT-Prüfung aus der Auswertung ausgeschlossen, wird ein weniger konservativer Quantilwert berechnet. Der entsprechende Mittelwert der Abweichungen sowie die zugehörige Standardabweichung ergeben sich wie folgt, siehe auch Bild 6-22b:

- $b_{\text{gem}} = 0,51 \text{ mm}$
- $s = 1,32 \text{ mm}$
- $b_{0,05} = 2,69 \text{ mm}$.

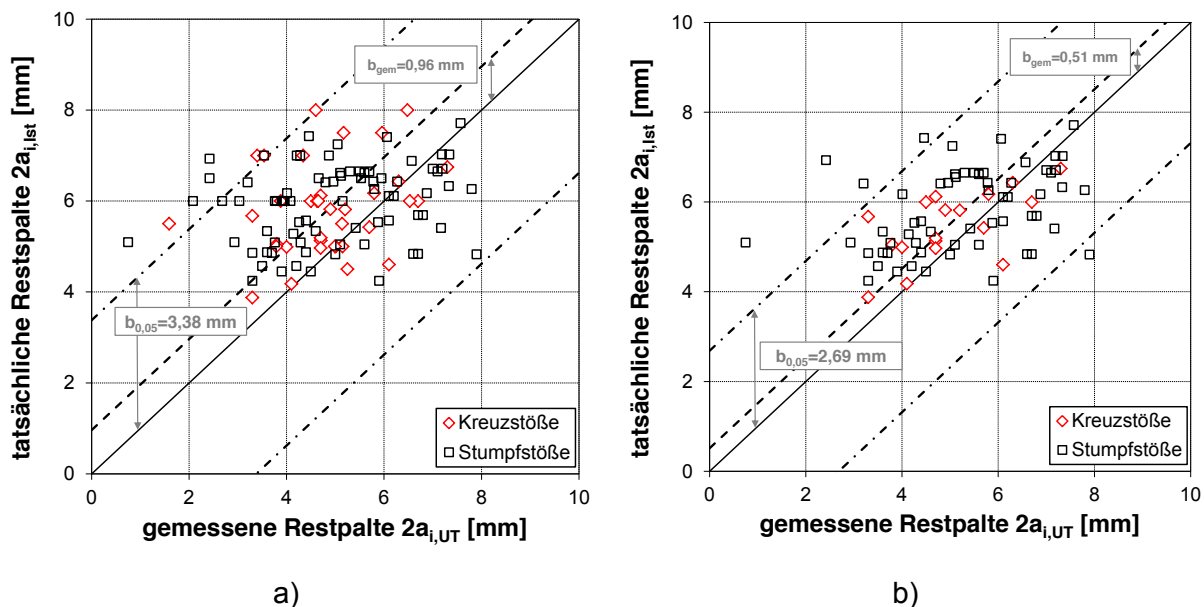


Bild 6-22 Gegenüberstellung der mit dem Phased-Array-Ultraschallverfahren gemessenen und der wahren Restspaltgrößen für DHY-Schweißnähte an Kreuz- und Stumpfstoßverbindungen für a) alle Messergebnisse inklusive der Daten aus der Bruchflächenanalyse und der MT-Prüfung sowie für b) die Messergebnisse aus der Bruchflächenanalyse ohne die Ergebnisse der MT-Prüfung

Das 5 %-Quantil wird als Vorhaltemaß Δ für zukünftige Restspaltdmessungen mit dem Phased-Array-Verfahren an DHY-Nähten empfohlen.

6.5 Zusammenfassung

Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung ist ein wichtiges Instrument zur Beschaffung von Informationen hinsichtlich der Ausführungsqualität eines Bauteils. Bei dickwandigen Bauteilen

im Bereich des Stahlbaus ist die Ultraschallprüfung oft das einzige sinnvoll einsetzbare Volumenprüfverfahren. Die Magnetpulverprüfung ist auf eine Aussage über die Bauteiloberfläche begrenzt. Die Durchstrahlungsprüfung ist bei größeren Wandstärken oder komplexen Geometrien im Stahlbau oft nicht anwendbar.

Die Weiterentwicklung von Prüfmethoden mittels Ultraschall, die zu einer quantitativen Aussage über die gefundenen Ungängen führt, ist von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Im Falle der hier betrachteten Restspalte ermöglicht die Größenbestimmung die Anwendung von theoretischen Methoden der Bruchmechanik oder Betriebsfestigkeit. So kann eine Aussage über die Bauteilsicherheit gemacht werden, und unnötige Reparaturen von unkritischen Restspalten können vermieden werden.

In dem abgeschlossenen AiF-Forschungsvorhaben 14174 N wurde die Größe von ungenügenden Durchschweißungen, sogenannten Restspalten, mittels Ultraschallprüfung ermittelt. Hierzu wurde die Laufzeitdifferenz von Randwellen, die an Restspalten entstehen, ausgewertet. In dem hier beschriebenen Folgevorhaben (AiF 14715 N) wurde dieses Prinzip mittels der Gruppenstrahlertechnik (Phased Array) ebenfalls genutzt. Die Gruppenstrahlertechnik vereinfacht die Anwendung dieses Prüfprinzips erheblich, da sie dem Prüfer die erforderlichen Berechnungen abnimmt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass eine weitere Optimierung der Schallfeldgeometrie für die beschriebene Vorgehensweise möglich ist. In den durchgeführten Untersuchungen führte die Fokussierung des Schallfeldes zu einer Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes und damit zu einer leichteren Auswertung von schwachen Randwellenechos.

Als Ergebnis der Untersuchungen konnten auf statistischer Grundlage und in Abhängigkeit der verwendeten Ultraschalltechnik ein Vorhaltemaß Δ zur Ermittlung der Bemessungsrestspaltgröße a' bzw. $2a'$ abgeleitet werden. Dieses Vorhaltemaß ist gemäß Gl. (6-4) auf die gemessene Anzeige a_{UT} bzw. $2a_{UT}$ zu addieren.

Aussage hinsichtlich Mittelwert bzw. Fraktilwert, was ist zu verwenden?

$$\begin{aligned} a' &= a_{UT} + \Delta && \text{für einseitig geschweißte Nähte} \\ 2a' &= 2a_{UT} + \Delta && \text{für doppelseitig geschweißte Nähte} \end{aligned} \quad (6-4)$$

mit

Δ : Vorhaltemaß gemäß Tabelle 6-4

Tabelle 6-4 Empfehlungen für das Vorhaltemaß Δ in Abhängigkeit der Prüfmethoden und der Schweißnahtform

	Herkömmliches UT-Verfahren mit modifizierten Prüfköpfen auf Basis von Randwellen		Gruppenstrahlertechnik (Phased Array)	
	Mittelwert	5 %-Fraktil	Mittelwert	5 %-Fraktil
HY-Naht	3,3 mm	6,3 mm	-	-
DHY-Naht	0 mm ^{*)}	2,3 mm ^{*)}	1,0 mm	3,4 mm

^{*)} Diese Werte beruhen auf Auswertungen an nur zwei DHY-Proben (18 Messwerte). Die Grundgesamtheit ist deswegen nicht repräsentativ.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Der Restspalt wurde konservativ mit seiner schärfstmöglichen Kerbwirkung als Riss interpretiert und die charakteristischen Lasten mit ungünstigstem Effekt bei tiefster Einsatztemperatur angesetzt.

Zur Ermittlung der bruchmechanischen Beanspruchung wurden sowohl numerische Simulationen als auch Handrechenformeln aus der Literatur herangezogen. Zur Anwendung für die numerischen Berechnungen kam die BE-Software BEASY. Die erzielten Ergebnisse wurden mit Handrechenformeln nachgerechnet und validiert.

Beim Vergleich beider Methoden stellten sich die aus den Handrechenformeln resultierenden Spannungsintensitätsfaktoren als konservativer heraus. Folglich wurde durch Variation der maßgeblichen geometrischen Parameter die bruchmechanische Beanspruchung auf der sicheren Seite liegend mit Funktionen aus der Literatur bestimmt.

Die so erzielten Ergebnisse dienten als Eingangsparameter für das Nachweisformat zur Vermeidung von Sprödbruch gemäß DIN EN 1993-1-10 bzw. DAST Richtlinie 009, so dass kritische Restspaltlängen abgeleitet werden konnten. Dies erfolgte sowohl für Bauteile unter vorwiegend ruhender als auch für Bauteile unter nicht ruhender Beanspruchung. Für alle untersuchten Bemessungsszenarien konnten Restspalte toleriert werden. Durch die gezielte Veränderung der folgenden Einflussgrößen kann eine zulässige Restspaltlänge verändert werden:

- Erniedrigung des Lastniveaus
- Erhöhung der Einsatztemperatur
- Wahl einer höheren Gütegruppe

7.2 Ausblick

Die erzielten Forschungsergebnisse und diejenigen aus dem Vorgängerprojekt [1] können als Grundlage zur Erstellung einer neuen DAST-Richtlinie dienen. Es wurden sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die eine Klassifizierung von nicht vollständigen Durchschweißungen mit hinreichender Sicherheit zulassen. Die in den Forschungsberichten hinterlegten Diagramme können in Tabellenform direkt als Hilfstafel in eine neue Richtlinie einfließen, die ein einfaches Ablesen zulässiger Restspaltgrößen für unterschiedliche Bauteilgeometrien sowohl für statisch beanspruchte Bauteile (z.B. Hochbau) als auch für ermüdungsbeanspruchte Bauteile (z.B. Brückenbau) erlaubt.

Ein Vorschlag für eine Tabelle, die in eine neue DAST-Richtlinie integriert werden könnte, ist für vorwiegend ruhend beanspruchte Kreuzstoßverbindungen in Tabelle 7-1 und für Stumpfstoßverbindungen in Tabelle 7-2 gezeigt. Die Tabellen sind an die Darstellungsform der DAST-Richtlinie 009 angelehnt und ermöglichen das Ablesen der zulässigen Spaltlänge in Abhängigkeit des Spannungsniveaus, der geometrischen Randbedingungen (Zugblechdicke und ggf. Stirnblechstärke bei Kreuzstößen) und der Stahlsorte und der Stahlgüteklasse.

Tabelle 7-1 Vorschlag für eine Tabelle in einer neuen DAST-Richtlinie für zulässige Restspaltgrößen a_{stat} [mm] für Kreuzstoßverbindungen mit DHY-Schweißnaht, vorwiegend ruhend beansprucht

			$\sigma_{\text{Ed}} = 0,25 \cdot f_y(t)$				$\sigma_{\text{Ed}} = 0,50 \cdot f_y(t)$				$\sigma_{\text{Ed}} = 0,75 \cdot f_y(t)$			
Stahlsorte		Zugblechdicke	Stirnblechdicken-Zugblechdicken-Verhältnis t_s/t [-]											
Stahlsorte	Stahlgüte	t [mm]	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0
S355	JR	20												
		40												
		60												
		80												
		100												
S355	J0	20												
		40												
		60												
		80												
		100												
S355	J2	20												
		40												
		60												
		80												
		100												
S355	K2 M N	20												
		40												
		60												
		80												
		100												
S355	ML NL	20												
		40												
		60												
		80												
		100												

- Anmerkungen:**
- 1) Die zulässigen Restspaltlängen gelten für eine Referenzverbindung eines Kreuzstoßes mit einer Breite von $B_{\text{ref}} = 100$ mm. Für abweichende Breiten sind die angegebenen Restspaltlängen mit dem Faktor $f_{\text{mod}}(B) = B_{\text{ref}} \cdot f(B)$ anzupassen.
 - 2) Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden. Extrapolationen in Bereiche außerhalb der angegebenen Grenzen sind nicht zulässig.
 - 3) Für Bauteile, die ausschließlich Druckspannungen ausgesetzt sind, ist das Spannungsniveau $\sigma_{\text{Ed}} = 0,25 \cdot f_y(t)$ anzuwenden.

Tabelle 7-2 Vorschlag für eine Tabelle in einer neuen DAST-Richtlinie für zulässige Restspaltgrößen a_{stat} [mm] für Stumpfstoßverbindungen mit DHY-Schweißnaht, vorwiegend ruhend beansprucht

		$\sigma_{\text{Ed}} = 0,25 \cdot f_y(t)$					$\sigma_{\text{Ed}} = 0,50 \cdot f_y(t)$					$\sigma_{\text{Ed}} = 0,75 \cdot f_y(t)$				
Stahlsorte		Zugblechdicke t [mm]														
Stahl-sorte	Stahlgüte	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
S235	JR															
	J0															
	J2															
S275	JR															
	J0															
	J2															
	M, N															
	ML, NL															
S355	JR															
	J0															
	J2															
	K2, M, N															
	ML, NL															
S420	M, N															
	ML, NL															
S460	Q															
	M, N															
	QL															
	ML, NL															
	QL1															
S690	Q															
	$T_{40J} = 0^\circ\text{C}$															
	$T_{30J} = -20^\circ\text{C}$															
	QL															
	$T_{40J} = -20^\circ\text{C}$															
	$T_{30J} = -40^\circ\text{C}$															
	QL1															
	$T_{40J} = -40^\circ\text{C}$															
$T_{30J} = -60^\circ\text{C}$																

Da diese Tabellen strenggenommen ausschließlich für eine Referenzbauteilbreite B_{ref} gültig sind, könnte durch einen Modifikationsbeiwert $f_{\text{mod}}(B)$ eine Anpassung der Tabellenwerte auf abweichende Bauteilbreiten erfolgen. Gelingt dies nicht, müssten weitere Tabellen für stan-

standardisierte Blechbreiten entwickelt werden. Weiterhin könnten diese Tabellen auch für definierte Ermüdungsspannungsschwingbreiten für definierte Lastwechselzahlen (z.B. 2.000.000 bzw. 5.000.000) abgeleitet werden. Darüberhinaus gelten die Tabellen nur für eine definierte Einsatztemperatur.

Insbesondere für kleinere und mittelständische Unternehmen wäre die Bewertung nicht normenkonformer Schweißverbindungen mit einer neuen DAST-Richtlinie ein enormer Fortschritt. Denn bislang war der Nachweis einer vollständigen Durchschweißung erforderlich, was oft zeit- und kostenintensive Reparaturschweißungen mit sich führte.

8 Literaturverzeichnis



- [1] Feldmann, M., Höhler, S., Eichler, B., Fischer, H., Schmeink, H.: Feststellung und Bewertung zulässiger Restspalte beim Schweißen. DAST- AiF- Forschungsprojekt 14174 N, 2007.
- [2] DIN EN 1993-1-10: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung. Dezember 2010.
- [3] DAST-Richtlinie 009: Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten. Januar 2005
- [4] Radaj, D., Sonsino, C.M.: Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten. Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2000.
- [5] Niemi, E.: Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components – Designer’s Guide. IIW Doc. XIII-1819r1-03/XV1090r1-03.
- [6] DIN EN ISO 5817: Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO 5817:2003 + Cor.1:2006). Oktober 2006.
- [7] DIN EN 1090-2: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken. 2008.
- [8] DIN EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung. Dezember 2010.
- [9] DIN 18800-7: Stahlbauten – Teil 7: Ausführung und Herstellerqualifikation. November 2008.
- [10] DIN 18800-1: Stahlbauten – Teil 1: Bemessung und Konstruktion. November 2008.
- [11] DIN EN 1993-1-9: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung. Dezember 2010.
- [12] Westergaard, H.M.: J. Appl. Mech. 6, S.49, 1939.
- [13] Rice, J.R.: A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. J. of Appl. Mech. 35, p. 379-386, 1968.
- [14] Wells, A. A.: Unstable Crack Propagation in Metals: Cleavage and Fast Fracture. Proc. Symp. Crack Propagation, p. 210-230, Cranfield 1961.
- [15] Paris, P.C., Gomez, M.P., Anderson, W.F.: A Rational Analytic Theory of Fatigue. Trend in Engineering 13, pp. 9, 1961.
- [16] JRC Scientific and Technical Report: Commentary and Worked Examples to EN 1993-1-10 “Material Toughness and Through Thickness Properties and other Toughness oriented Rules in EN 1993”. EUR 23510, 2008.


-
- [17] Barsom, J.M., Rolfe, S.T.: Fracture & Fatigue Control in Structures. Applications of Fracture Mechanics, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [18] Hobbacher, A.: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW Document IIW-1823-07 ex XIII-2151-07/XV-1254-07, International Institute of Welding, June 2008.
- [19] Höhler, S.: Beitrag zur Erweiterung der Regelungen der Stahlsortenauswahl zur Vermeidung von Sprödbruch auf Anschlüsse unter vorwiegend ruhender Beanspruchung. Diss. RWTH Aachen, Schriftenreihe Stahlbau, Heft 58, Shaker Verlag, Aachen 2006.
- [20] DIN EN 10025, Teile 1 und 2: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen: Allgemeine technische Lieferbedingungen und Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle. Februar 2005.
- [21] Sanz, G.: Essai de mise au point d'une méthode quantitative de choix des qualités d'aciers vis-à-vis du risqué de rupture fragile. Revue de Métallurgie, CIT, pp. 621-642, July 1980.
- [22] SEW 088: Schweißgeeignete Feinkornbaustähle - Richtlinie für die Verarbeitung, besonders für das Schmelzschweißen. 4. Ausgabe, Oktober 1993.
- [23] Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2 – Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. 3., bearbeitete Auflage, Springer Verlag, 2005.
- [24] Rosenthal, D.: The Theory of Moving Sources of Heat and its Application to Metal Treatments. Transaction of the American Society for Metal, 1946, p. 849-866.
- [25] Rykalin, N.N.: Berechnung der Wärmeporgänge beim Schweißen. Berlin, Verlag Technik, 1957.
- [26] DIN EN 10045-1: Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy – Prüfverfahren. 1991.
- [27] SEP 1202: Ermittlung des Einflusses der Schweißbedingungen auf die Zähigkeit in der Wärmeeinflusszone von Mehrlagenverbindungen. 1. Ausgabe, 1986.
- [28] BEASY: User Guide + BEASY Crack Growth Verification Guide. Computational Mechanics BEASY, Southampton, UK, 1998.
- [29] Citarelli, S.: Bruchmechanische Bewertung von Stumpfstoßverbindungen mit ungenügender Durchschweißung. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, RWTH Aachen University, 2010.
- [30] Murakami, Y.: Stress Intensity Factors Handbook - Volume 1 and Volume 2. Pergamon Press, Frankfurt, 1987.
- [31] Guerney, T.T.: Fatigue of Welded Structures. Cambridge University Press, Cambridge 2nd ed., 1978.
- [32] Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens. 4., neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
-

- [33] DIN EN 1991-1-5: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen - Temperatureinwirkungen. Dezember 2010.

Anhang A Probeschweißungen


Anhang A.1 Schweißanweisung Züblin Stahlbau GmbH

		Züblin Stahlbau GmbH Projektsteuerung, Tragwerksplanung, Konstruktion, Werkstattfertigung und Montage von Stahl- und Komplettbauten			
Welding Procedure Specification (WPS) Schweißanweisung according to / nach EN ISO 15609-1:2004					
Place:	HOSENA, ZSH Workshop	Ort:	HOSENA, ZSH Fertigungswerkstatt		
WPS No.:	test 01.12.2009 t8/5	WPS Nr.:	Versuch 01.12.2009 t8/5		
WPQR No.:		WPQR Nr.:			
Manufacturer:	Züblin Stahlbau GmbH, Hosena	Hersteller:	Züblin Stahlbau GmbH, Hosena		
Material spez. (acc. EN 10025):	S355	Material (nach EN 10025):	S355		
group of materials (acc. CN ISO 15608):	1.2	Werkstoffgruppe (nach CN ISO 15608):	1.2		
Thickness:	40 mm	Materialdicke:	40 mm		
Diameter:	N / A	Durchmesser:	nicht anwendbar		
Welding process:	SMAW (135)	Schweißprozess:	MAG (135)		
Connection category:	butt weld	Verbindungsart:	Stumpfnah		
Kind of joint:	V - joint	Nahtform:	DHY - Naht		
Position of welding:	PA	Schweißposition:	PA		
Preperation and cleaning:	flame cutting / grinding	Nahtvorbereitung:	Brennschneiden / Schleifen		
Manuel / machine:	manual	Manuell / maschienell:	manuell		
Single / multiple pass:	multiple pass	Ein- / mehrlagig:	mehrlagig		
Arc modus:	spray arc	Lichtbogenart:	Sprühlichtbogen		
Filler metal specification:	EN 440 G 46 4 M G4Si1	Zusatzwerkstoff:	EN 440 G 46 4 M G4Si1		
Brand name:	NORMAG 3	Bezeichnung:	NORMAG 3		
Shield gas:	M21	Schutzgas:	M21		
Flow rate:	14 L	Gasdurchflußmenge:	14 L		
Backing	N / A	Schweißbadsicherung:	ohne		
Preheat temperature:	N / A	Vorwärmtemperatur:	nicht erforderlich		
Interpass temperature:	120 - 140 °C	Zwischenlagentemperatur:	< 250°C		
Heat treatment:	N / A	Wärmebehandlung:	nicht erforderlich		
Root treatment:	N / A	Wurzelbehandlung:	nicht erforderlich		
Further information:					
Oscillation (max. width of welding bead):	15 mm	Pendeln (max. Raupenbreite):	15 mm		
Distance surface - contact cone:	ap. 15 mm	Kontaktdüsenabstand/Werkstück:	15 mm		
Welding torch angle:	ap. 70 °	Brenneranstellwinkel:	ca. 70°		



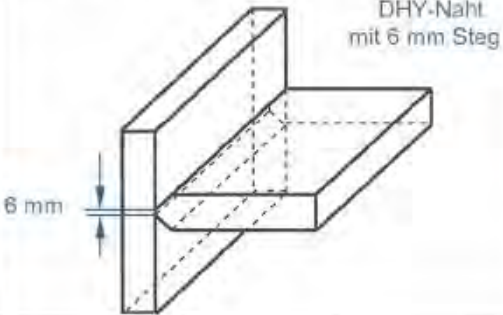
Züblin Stahlbau GmbH

Projektsteuerung, Tragwerksplanung, Konstruktion.
Werkstattfertigung und Montage von Stahl- und Komplettbauten



DIN EN ISO 9001
Zertifikat 15 100 6100

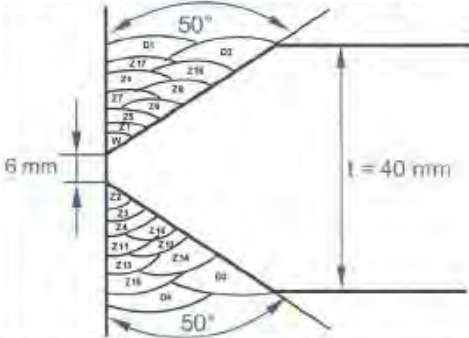
Shape of joint / Gestaltung der Verbindung



DHY-Naht mit 6 mm Stab

6 mm

Cycle of welding / Schweißfolge



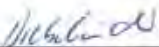
6 mm

50°

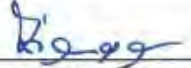
t = 40 mm

details for welding

welding bead No.	Process	Diameter of filler material	Current	Voltage	current/polarity	Flux	Welding progression	Heat insertion
Schweißraupe Nr.	Schweißprozess	Drahtdurchmesser	Strom	Spannung	Stromart/Polung	Drahtvorschub	Schweißgeschwindigkeit	Wärme einbringung
		[mm]	[A]	[V]		[m/min]	[m/min]	kJ/m
W	135	1,2	110 - 130	16 - 18	=/+	3 - 5	100 - 150	/
Z	135	1,2	240 - 260	26 - 28	=/+	9 - 11	300 - 350	< 250
>Z1	135	1,2	280 - 320	30 - 32	=/+	10 - 14	350 - 450	< 250
D	135	1,2	280 - 320	30 - 32	=/+	10 - 14	350 - 450	< 250

issued / ausgestellt Bretschneider, 21.10.2009 

Name, date, signature / Name, Datum, Unterschrift

reviewed / geprüft Zimmermann, 21.10.2009 

Name, date, signature / Name, Datum, Unterschrift

Anhang A.2 Materialzeugnisse

UT-Prüfung und Aufschweißbiegeversuch

Dr.-Ing. F. Wiewecke
 Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger
 für Material- und Bauteilprüfung des
 allg. Fahrzeug- und Maschinenbaues
 Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger
 für Korrosionsschäden
 Crunbacher Str. 64a
 34277 Fuldabrück-Bergshausen
 Telefon (0561) 9 58 27 83/84
 Telefax (0561) 9 58 27 85

WERKSTOFFPRÜFLABOR
 metallgraphisch
 DAP-Pl-3004-00
 Das Institut ist nach DIN EN ISO 9001:2008 zertifiziert
 und ist Mitglied im DLR-Netzwerk für die Fertigungstechnik

PRÜFZEUGNIS
***Ultraschallprüfung (DIN EN 10160) und Aufschweißbiegeversuch (SEP)**
Nr. 1813/09

Angeliefert wurde am 05.10.2009 von der Fa. Hackländer Vertriebsgesellschaft mbH,
 Holländische Straße 120, 34127 Kassel, vertreten durch Herrn Pfeiffer, ein Blechabschnitt

300 mm x 200 mm x 40 mm, Ch.- Nr. 391568, Tafel- Nr.: 09E6035418
 aus dem Werkstoff S355J2+N, Werkstoff- Nr. 1.0577

Umfang der Lieferung: 1 Tfl., Abmessung 6000 x 2000 x 40 mm
 Komm.- Nr. : 3237029
 Kunde : Züblin Stahlbau GmbH, Hosena

Das Prüflabor wurde beauftragt, an diesem Blechabschnitt einen Aufschweißbiegeversuch
 nach SEP 1390 durchzuführen und auszuwerten. Die Parameter der Versuchsdurch-
 führungen sind der SEP zu entnehmen.

Zusätzlich wurde eine US-Prüfung* nach DIN EN 10160 Fläche S1, Randzone E1 an der
 Tafel durchgeführt.

Ergebnis:

US-Prüfung nach DIN EN 10160 Fläche S1, Randzone E1 : **BESTANDEN**
 (Die US- Prüfung erfolgte vor dem Brennen und gilt nur für die Prüfgegenstände)

Aufschweißbiegeversuch nach SEP 1390 : **BESTANDEN**
 (Insgesamt sind drei Anrisse von SG in WEZ aufgetreten)

Fuldabrück- Bergshausen, 06. Oktober 2009




Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die angelieferten Prüfgegenstände.
 Der Prüfbericht darf ohne Genehmigung des Werkstoffprüflabors nicht veröffentlicht werden.
 Auch dürfen aus diesen Prüfberichten keine Angaben ohne schriftliche Genehmigung des
 Labors entnommen bzw. übernommen werden. Zuwiderhandlung wird strafrechtlich verfolgt.
 * Prüfung gehört nicht zum akkreditierten Bereich des Werkstoffprüflabors Dr. Wiewecke.

591 : 09



Prüfbericht 1813/09

Seite 1 von 1

099/245

MARCEGAGLIA
San Giorgio di Nogaro

Stabile Legato ad emersione
Via S. Maria 16
31040 Dossena di Montebelluna (TV)
Tel. +39 - 0423 665 1
Fax. +39 - 0423 665 206
www.marcegaglia.it

3.1 CERTIFICATO DI COLLAUDO EN 10204
1600918986
15/09/2009

Typ: 1600918986
Ausgangslage am: 15/09/2009

Qualifizierung
RESP.: R. Puntin
Stab. S. Giorgio di Nogaro

Partik. n.	Arbeits- schritte	Lieferung nr. von											TESTN	Rm (Mean)	Reh (Min)	AK (Max)	T (°C)	Kv1 (s)	Kv2 (s)	Kv3 (s)				
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Nb									V	N	Ti	Ceq
LTS 2000.0X 6000.0X 40.00 S355J2+N EN10025-2 6191611589/050 3019685 Data 08/09/2009																								
WARGEWALZTE GROBBLECHE																								
09ED012283	1 PZZ 393303	0.200	1.460	0.200	0.013	0.018	0.030	0.010	0.020	0.037	0.0020	0.0040	0.0090	0.0070	0.0080	0.4530	3X14522	562	384	27.5	-20	49	49	47
09ED012284	1 PZZ 393303	0.200	1.460	0.200	0.013	0.019	0.030	0.010	0.020	0.037	0.0020	0.0040	0.0090	0.0070	0.0080	0.4530	3X14522	562	384	27.5	-20	49	49	47
09ED012285	1 PZZ 391638	0.190	1.420	0.200	0.010	0.020	0.040	0.010	0.020	0.050	0.0020	0.0060	0.0090	0.0060	0.0060	0.4390	3X03205	551	382	28.5	-20	54	51	51
09ED012286	1 PZZ 391638	0.190	1.380	0.200	0.018	0.022	0.040	0.030	0.050	0.058	0.0030	0.0060	0.0090	0.0050	0.0050	0.4280	3X14521	543	359	28.5	-20	57	54	53
09ED012287	1 PZZ 391638	0.200	1.400	0.210	0.011	0.019	0.030	0.010	0.020	0.040	0.0020	0.0050	0.0070	0.0060	0.0060	0.4430	8-36751	523	353	30.0	-20	105	106	86
09ED012288	1 PZZ 391638	0.190	1.380	0.200	0.018	0.022	0.050	0.030	0.050	0.058	0.0030	0.0060	0.0090	0.0050	0.0050	0.4280	3X14521	543	359	28.5	-20	57	54	53

591/08

Benutzer:
TO: HERRA IRENE; EN 10204 cl. B

Mod. 095M Rev.3 Data: 03.11.09

50th
ANNIVERSARY
MARCEGAGLIA

CE
MARCEGAGLIA S.p.A.
Via S. Maria 16
31040 Dossena di Montebelluna (TV)
Italy

Gasgemisch

Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach EN 10204		IGV Standard Q-003A Stand 10/05	
Lieferant: Linde AG, Geschäftsbereich Linde Gas			
Lieferfahrzeug (Auflieger, Container, EKW): SK-L172 (07/4438)			
Lieferdaten: Empfänger: _____			
Herstellerwerk: 4 - 0984		Belegnr.: 23540851	
Produkt/Produktspezifikation: LAR 5.0			
Produktmerkmal		Anforderung	
Ar	%	>= 99,999	
O2	ppm	<= 2	
N2	ppm	<= 5	
CnHm	ppm	<= 0,2	
Prüfspezifikation			
Produktmerkmal		Anforderung	Prüfergebnis
CH4	ppm	<= 0,200	<= 0,200
O2	ppm	<= 2,00	<= 2,00
N2	ppm	<= 5,00	<= 5,00
Analysendatum / Uhrzeit: 26.11.2009 13:50			
Beurteilung: Das gelieferte Produkt erfüllt die Produkt- und die Prüfspezifikation.			
Bestätigung: Diese Prüfbescheinigung wurde durch EDV erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.			
Abnahmebeauftragter: Herr Hahnel			
Bemerkungen: verfahrensbedingt H2O < 2 ppm verfahrensbedingt nur CH4 als CnHm enthalten			
Ch.-B.: 098420091126020		Tank: LAR-Tank	
Zusatzangaben: %, ppm, ppb = Volumenanteile unter idealen Gasbedingungen			
Formblatt des Industriegasverbands e.V.			

E:\ZAV\DRP\papigwuni.qip

Schweißzusatzwerkstoff

03/11 2000 09:00 FAX 03361950398

DZ#

M. Bensch

01.001

DZW Drahtzieherei Wiesenburg GmbH

Inspection Certificate 3.1
According to EN 10204

Customer: Züblin
Stahlbau GmbH
Bahnhofstr. 13
01996 Hosena

NE 03.11.09 (Ch.)

Specification: Welding wire
DIN EN ISO 14341: G4Si1

Trade name: Normag3 Fass



Diameter: 1,2 mm

Batch	C	Si	Mn	P	S
722421	0,072	0,944	1,650	0,011	0,011
724180	0,078	0,931	1,640	0,010	0,012

Batch	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
722421	0,029	0,015	0,003	0,011	0,001
724180	0,019	0,016	0,002	0,010	0,001

Mechanical values

G4 Si 1

	Re N /mm ²	AV J	KvJ - 20°C	Rm N/mm ²	R 5 %
	> 460	> 46 J	> 46 J	530-600	> 24

The chemical values agree with certificate 3.1 from manufacturer of raw material.

We confirm, that production is corresponding to the technical regulation of
DZW Drahtzieherei Wiesenburg GmbH.

Delivery condition: As agreed

Wiesenburg, 14.10.2009

Anhang A.3 Schweißparameter

Raupen-Nr.			Bez. SLV	Position	Blechdicke [mm]	Nahtlänge [mm]	Schweißzeit [s]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Streckenenergie [kJ/cm]	$t_{8/5}$ -Zeit [s]	Zwischenlagentemperatur [°C]
1	7	Wurzel, oben	40	500	82,0	36,6	278,4	32,8	15,02	3,9	0		
2	12	Wurzel, unten	40	500	86,8	34,6	277,4	32,8	15,87		nicht gemessen		
3	14	Füllage 1, unten	40	500	105,0	28,6	300,0	33,6	21,38	7,1	nicht gemessen		
4	15	Füllage 2, unten	40	500	76,4	39,3	296,4	33,7	15,39	5,2	nicht gemessen		
5	16	Füllage 3, unten	40	500	70,9	42,3	307,7	33,6	14,60	5,2	nicht gemessen		
6	19	Füllage 1, oben	40	500	72,0	41,7	316,6	33,7	15,48		nicht gemessen		
7	20	Füllage 2, oben	40	500	82,2	36,5	327,3	33,9	18,31	7,8	nicht gemessen		
8	21	Füllage3 oben	40	500	66,2	45,3	320,2	33,8	14,38		nicht gemessen		
9	22	Decklage 1, oben	40	500	92,6	32,4	298,3	33,9	18,79	9,6	nicht gemessen		
10	23	Decklage 2, oben	40	500	74,3	40,4	313,3	33,9	15,82		nicht gemessen		
11	24	Decklage 1, unten	40	500	79,2	37,9	306,8	33,8	16,49	7,7	nicht gemessen		
12	25	Decklage 2, unten	40	500	70	42,9	304,3	33,9	14,48		nicht gemessen		

Nahtform (DHY) und Nahtaufbau

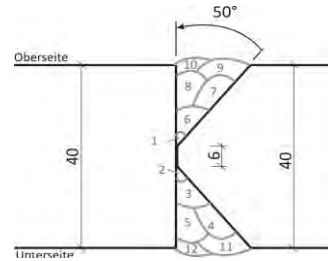


Bild A-1 Schweißparameter der Probeschweißung Nr. 1

Raupen-Nr.			Bez. SLV	Position	Blechdicke [mm]	Nahtlänge [mm]	Schweißzeit [s]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Streckenenergie [kJ/cm]	$t_{8/5}$ -Zeit [s]	Zwischenlagentemperatur [°C]
1	34	Wurzel, oben	40	500	92,0	32,6	282,8	32,7	17,09	4,6	0		
2	41	Wurzel, unten	40	500	85,4	35,1	291,8	32,8	16,39	4,5	nicht gemessen		
3	44	Füllage 1, unten	40	500	79,8	37,6	390,6	37,8	23,58		nicht gemessen		
4	45	Füllage 2, unten	40	500	74,6	40,2	345,3	36,6	18,86	8,2	nicht gemessen		
5	46	Füllage 3, unten	40	500	73,2	41,0	304,5	33,1	14,80		nicht gemessen		
6	47	Füllage 1, oben	40	500	103,4	29,0	337,1	34,2	23,88	9,3	nicht gemessen		
7	48	Füllage 2, oben	40	500	99,7	30,1	315,4	33,7	21,25	10,0	nicht gemessen		
8	49	Decklage 1, oben	40	500	92,2	32,5	323,7	34,0	20,25	10,7	nicht gemessen		
9	50	Decklage 2, oben	40	500	99,6	30,1	310,9	33,9	20,96	12,3	nicht gemessen		
10	51	Decklage 1, unten	40	500	104,1	28,8	298,5	33,5	20,88	12,0	145		
11	52	Decklage 2, unten	40	500	99,7	30,1	318,3	33,5	21,30	13,3	165		

Nahtform (DHY) und Nahtaufbau

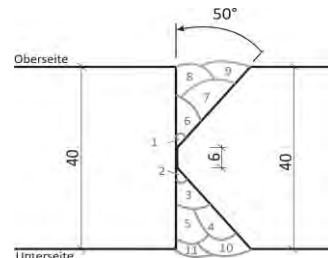


Bild A-2 Schweißparameter der Probeschweißung Nr. 2

Raupen-Nr.		Bez. SLV	Position	Blechdicke [mm]	Nahtlänge [mm]	Schweißzeit [s]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Streckenenergie [kJ/cm]	$t_{8/5}$ -Zeit [s]	Zwischenlagentemperatur [°C]
1	62		Wurzel, oben	40	500	101,6	29,5	289,9	32,4	19,13	4,9	66
2	69		Wurzel, unten	40	500	100,3	29,9	229,4	32,5	19,59	5,9	93
3	70		Füllage 1, unten	40	500	156,3	19,2	295,7	32,7	30,21	11,8	135
4	71		Füllage 1, oben	40	500	160,7	18,7	289,7	32,7	30,44	12,6	155
5	72		Decklage 1, oben	40	500	129,9	23,1	298,4	32,6	25,32	13,8	152
6	73		Decklage 2, oben	40	500	143,6	20,9	292,8	32,6	27,47	13,5	159
7	75		Decklage 1, unten	40	500	146,3	20,5	290,3	32,7	27,76		175
8	76		Decklage 2, unten	40	500	157,6	19,0	285,4	32,6	29,37	17,4	196

Bild A-3 Schweißparameter der Probeschweißung Nr. 3

Raupen-Nr.		Bez. SLV	Position	Blechdicke [mm]	Nahtlänge [mm]	Schweißzeit [s]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Streckenenergie [kJ/cm]	$t_{8/5}$ -Zeit [s]	Zwischenlagentemperatur [°C]
1	6		Wurzel, oben	40	500	85,6	35,0	276,1	32,4	15,38	3,8	44
2	12		Wurzel, unten	40	500	83,2	36,1	286,6	32,6	15,57	4,1	72
3	13		Füllage 1, unten	40	500	88,0	34,1	291,9	32,7	16,78	5,6	97
4	14		Füllage 2, unten	40	500	66,0	45,5	300,6	32,6	12,95	6,1	98
5	15		Füllage 3, unten	40	500	68,8	43,6	289,1	32,6	12,98	5,6	119
6	16		Füllage 1, oben	40	500	72,8	41,2	288,2	32,6	13,69	5,6	134
7	18		Füllage 2, oben	40	500	73,6	40,8	297,3	32,8	14,31		131
8	19		Füllage3 oben	40	500	72,0	41,7	297,6	32,6	13,97		150
9	20		Decklage 1, oben	40	500	68,3	43,9	299,5	32,6	13,35	7,5	145
10	21		Decklage 2, oben	40	500	68,2	44,0	284,0	32,5	12,63	7,4	159
11	22		Decklage 3, oben	40	500	69,1	43,4	291,8	32,6	13,15	7,8	164
12	23		Decklage 1, unten	40	500	69,7	43,0	282,9	32,6	12,86	7,7	146
13	24		Decklage 2, unten	40	500	63,8	47,0	283,9	32,5	11,81	7,8	155
14	25		Decklage 3, unten	40	500	71,4	42,0	292,8	32,7	13,65	8,1	165

Bild A-4 Schweißparameter der Probeschweißung Nr. 4

Anhang A.4 Monitoring von Schweißstrom und –spannung

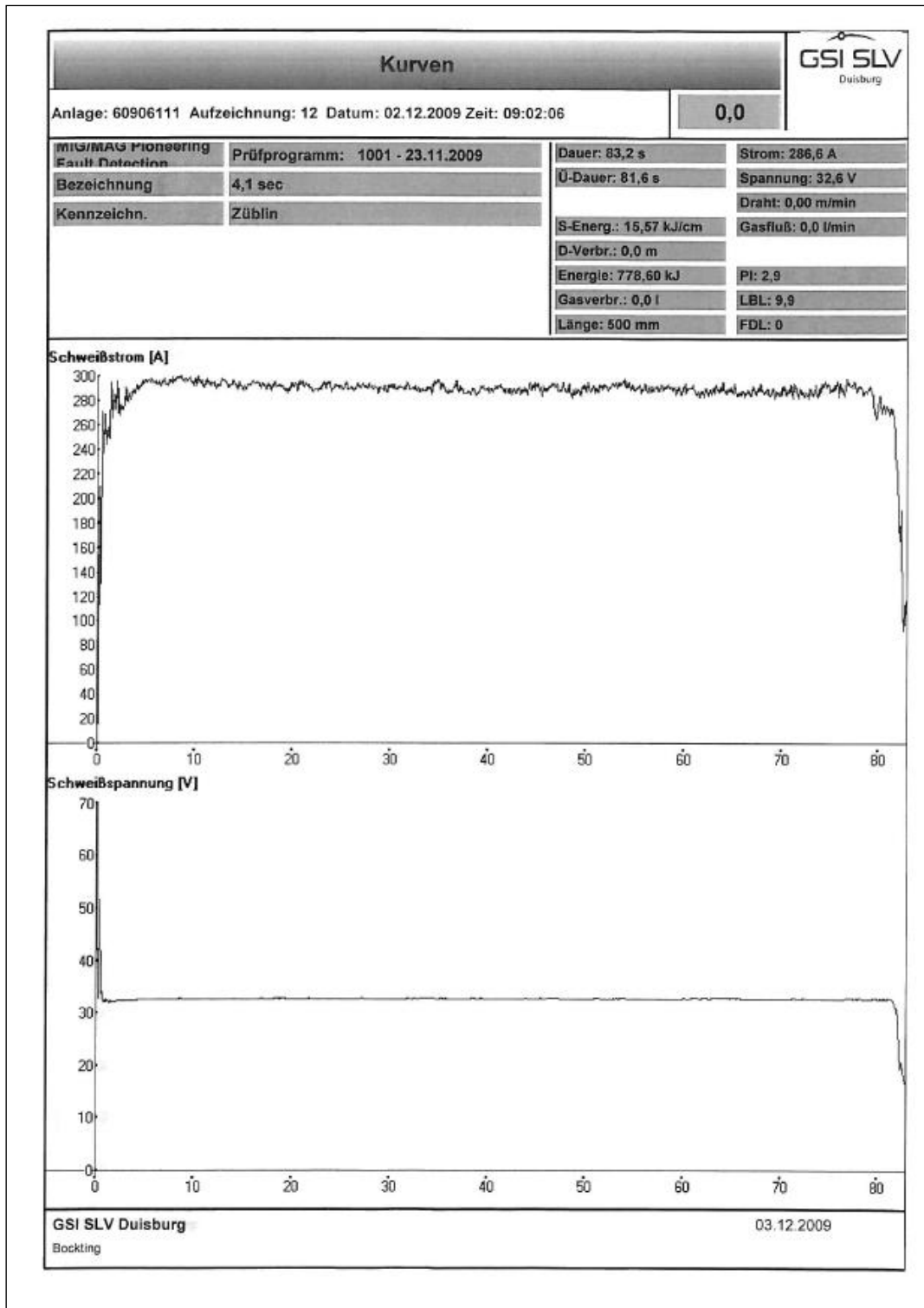


Bild A-5 Monitoring von Schweißstrom und –spannung am Beispiel der Probe 04, Schweißbraupe 2

Anhang A.5 Analytische Bestimmung der $t_{8/5}$ -Zeiten

Bei den Proben „01“ und „02“ wurden die Zwischenlagentemperaturen zum größten Teil nicht gemessen. Deswegen wurden unter Berücksichtigung der Zwischenlagentemperaturen der Proben „03“ und „04“, diese Werte geschätzt (in rot dargestellt).

Raupen-Nr.	Position	T_0	k	E	F_2	F_3	$t_{8/5,3D}$	$t_{8/5,2D}$
		[°C]	[-]	[kJ/mm]	[-]	[-]	[s]	[s]
1	Wurzel, oben	0	0,8	1,20	0,90	0,90	6,0	0,85
2	Wurzel, unten	66	0,8	1,27	0,90	0,90	7,6	1,26
3	Füllage 1, unten	73	0,8	1,71	0,90	0,90	10,5	2,36
4	Füllage 2, unten	135	0,8	1,23	0,90	0,90	9,2	1,66
5	Füllage 3, unten	135	0,8	1,17	0,90	0,90	8,7	1,50
6	Füllage 1, oben	135	0,8	1,24	0,90	0,90	9,2	1,68
7	Füllage 2, oben	135	0,8	1,46	0,90	0,90	10,9	2,35
8	Füllage 3, oben	135	0,8	1,15	1,00	1,00	8,6	1,61
9	Decklage 1, oben	145	0,8	1,50	1,00	1,00	11,6	2,91
10	Decklage 2, oben	145	0,8	1,27	1,00	1,00	9,8	2,06
11	Decklage 1, unten	150	0,8	1,32	1,00	1,00	10,4	2,30
12	Decklage 2, unten	150	0,8	1,16	1,00	1,00	9,1	1,78

Bild A-6 Berechnung der $t_{8/5}$ -Zeit für die Probeschweißung 01

Raupen-Nr.	Position	T_0	k	E	F_2	F_3	$t_{8/5,3D}$	$t_{8/5,2D}$
		[°C]	[-]	[kJ/mm]	[-]	[-]	[s]	[s]
1	Wurzel, oben	0	0,8	1,37	0,90	0,90	6,9	1,10
2	Wurzel, unten	66	0,8	1,31	0,90	0,90	7,9	1,34
3	Füllage 1, unten	93	0,8	1,89	0,90	0,90	12,3	3,15
4	Füllage 2, unten	135	0,8	1,51	0,90	0,90	11,2	2,50
5	Füllage 3, unten	155	0,8	1,18	0,90	0,90	9,5	1,72
6	Füllage 1, oben	135	0,8	1,91	0,90	0,90	14,2	4,00
7	Füllage 2, oben	135	0,8	1,70	0,90	0,90	12,7	3,17
8	Decklage 1, oben	135	0,8	1,62	1,00	1,00	12,1	3,20
9	Decklage 2, oben	135	0,8	1,68	1,00	1,00	12,5	3,43
10	Decklage 1, unten	145	0,8	1,67	1,00	1,00	12,9	3,59
11	Decklage 2, unten	165	0,8	1,70	1,00	1,00	14,1	4,19

Bild A-7 Berechnung der $t_{8/5}$ -Zeit für die Probeschweißung 02

Raupen-Nr.	Position	T ₀	k	E	F ₂	F ₃	t _{8/5,3D}	t _{8/5,2D}
		[°C]	[-]	[kJ/mm]	[-]	[-]	[s]	[s]
1	Wurzel, oben	0	0,8	1,53	0,90	0,90	7,7	1,38
2	Wurzel, unten	66	0,8	1,57	0,90	0,90	9,4	1,92
3	Füllage 1, unten	93	0,8	2,42	0,90	0,90	15,7	5,17
4	Füllage 1, oben	135	0,8	2,44	0,90	0,90	18,1	6,51
5	Decklage 1, oben	155	0,8	2,03	1,00	1,00	16,2	5,59
6	Decklage 2, oben	152	0,8	2,20	1,00	1,00	17,4	6,47
7	Decklage 1, unten	159	0,8	2,22	1,00	1,00	18,0	6,87
8	Decklage 2, unten	175	0,8	2,35	1,00	1,00	20,2	8,45

Bild A-8 Berechnung der t_{8/5}-Zeit für die Probeschweißung 03

Raupen-Nr.	Position	T ₀	k	E	F ₂	F ₃	t _{8/5,3D}	t _{8/5,2D}
		[°C]	[-]	[kJ/mm]	[-]	[-]	[s]	[s]
1	Wurzel, oben	0	0,8	1,23	0,90	0,90	6,2	0,89
2	Wurzel, unten	44	0,8	1,25	0,90	0,90	7,0	1,10
3	Füllage 1, unten	72	0,8	1,34	0,90	0,90	8,2	1,44
4	Füllage 2, unten	97	0,8	1,04	0,90	0,90	6,8	0,97
5	Füllage 3, unten	98	0,8	1,04	0,90	0,90	6,9	0,98
6	Füllage 1, oben	119	0,8	1,10	0,90	0,90	7,7	1,21
7	Füllage 2, oben	134	0,8	1,14	0,90	0,90	8,5	1,43
8	Füllage 3, oben	131	0,8	1,12	0,90	1,00	8,2	1,34
9	Decklage 1, oben	150	0,8	1,07	1,00	1,00	8,4	1,51
10	Decklage 2, oben	145	0,8	1,01	1,00	1,00	7,8	1,31
11	Decklage 3, oben	159	0,8	1,05	1,00	1,00	8,5	1,54
12	Decklage 1, unten	164	0,8	1,03	1,00	1,00	8,5	1,52
13	Decklage 2, unten	146	0,8	0,94	1,00	1,00	7,3	1,16
14	Decklage 3, unten	155	0,8	1,09	1,00	1,00	8,7	1,62

Bild A-9 Berechnung der t_{8/5}-Zeit für die Probeschweißung 04

Anhang A.6 Makroschliffe

Die Makroschliffe wurden nach der Entnahme der Kerbschlagproben angefertigt. Dazu war es notwendig auf der Werkstückober- und Werkstückunterseite minimal Material abzuarbeiten. D.h., dass die genaue Ausarbeitung der Decklagen nicht erkennbar ist. Die Schliffbilder zeigen deswegen ein geringfügig schmalere Bereich ($t_{\text{Schliff, netto}} = 37 \text{ mm}$) und nicht die gesamte Probenhöhe ($t = 40 \text{ mm}$). Decklage

Probe 01:

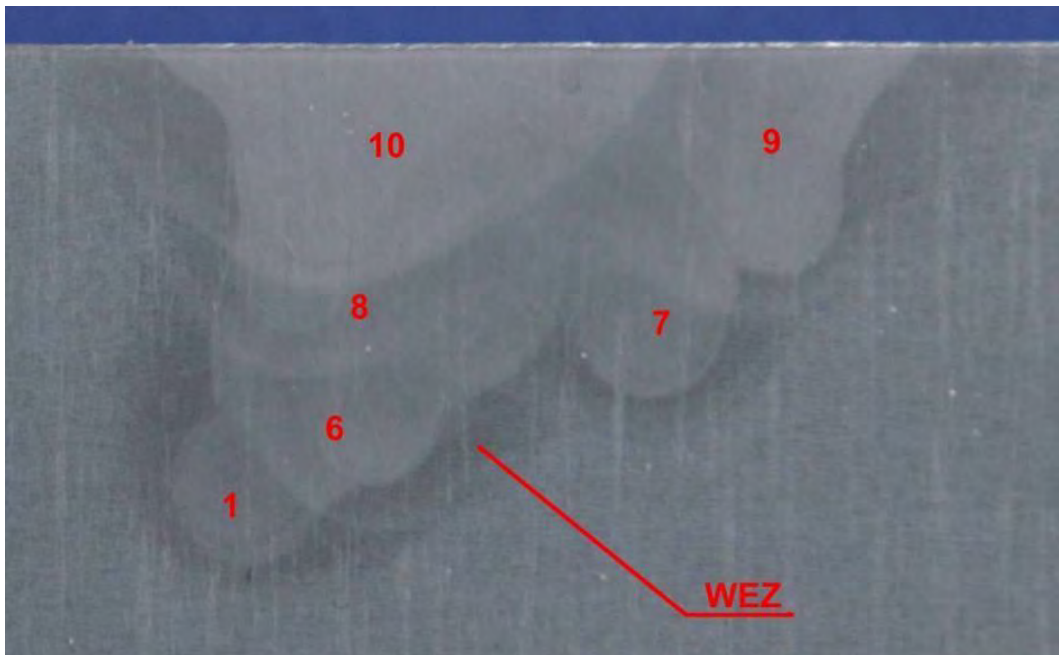


Bild A-10 Probe 01 - Ansicht oberer Teil der Schweißnaht

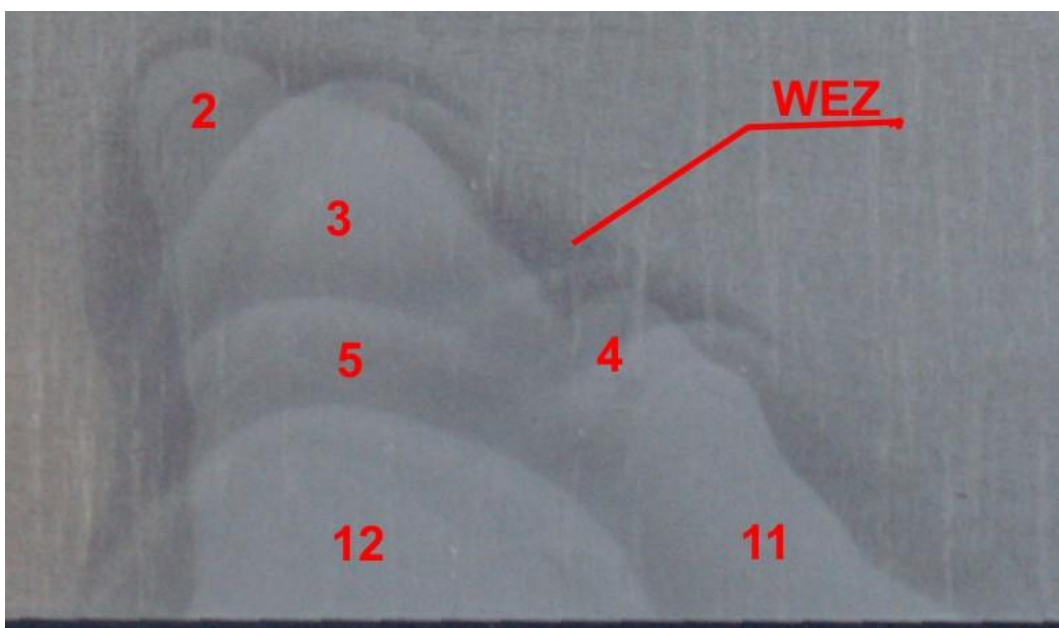


Bild A-11 Probe 01 - Ansicht unterer Teil der Schweißnaht

Probe 02:

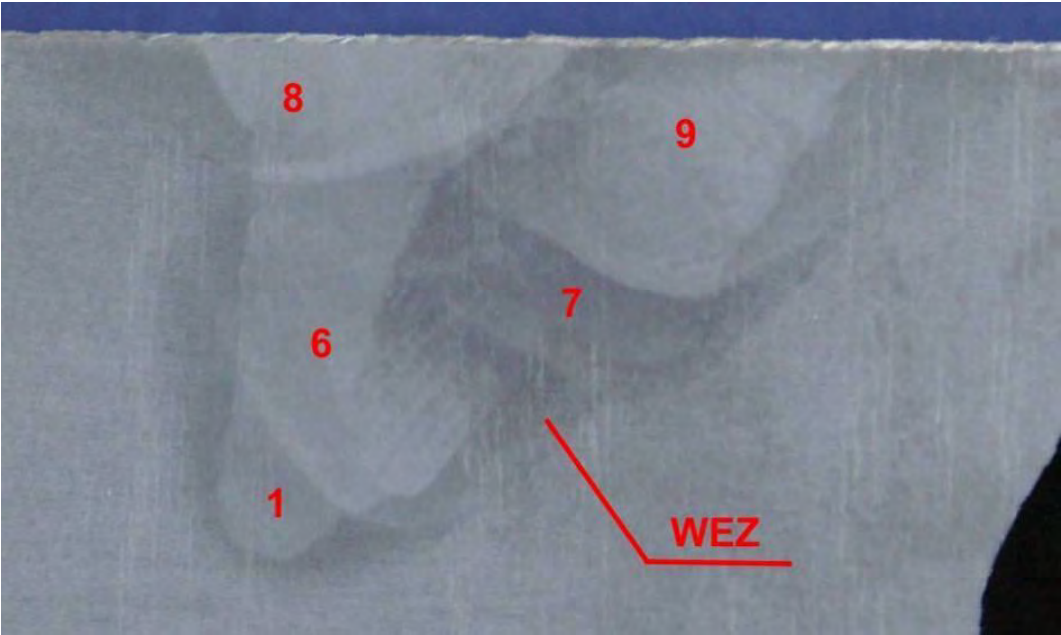


Bild A-12 Probe 02 - Ansicht oberer Teil der Schweißnaht

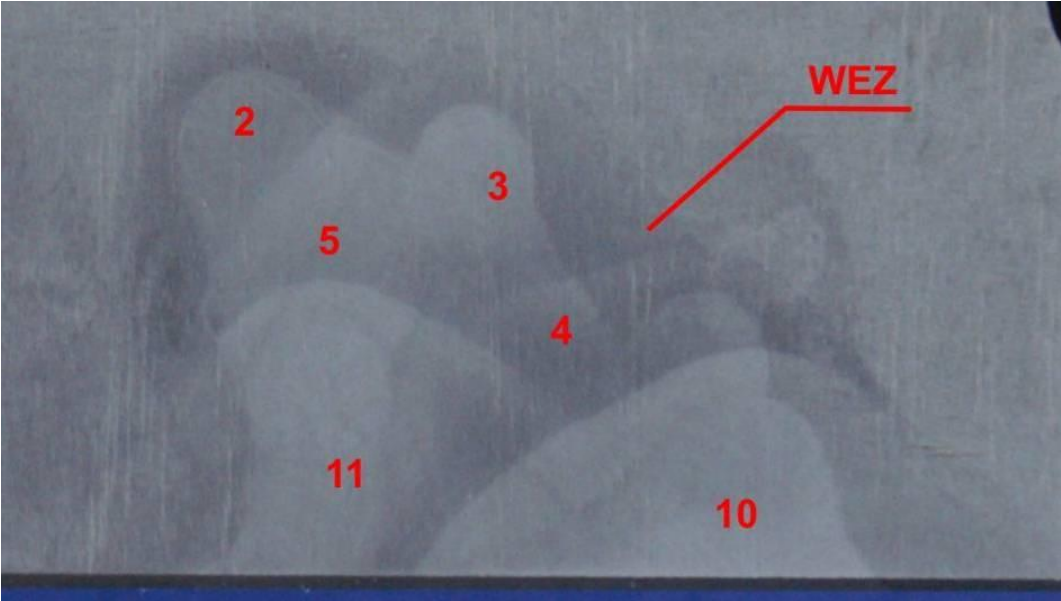


Bild A-13 Probe 02 - Ansicht unterer Teil der Schweißnaht

Probe 03:

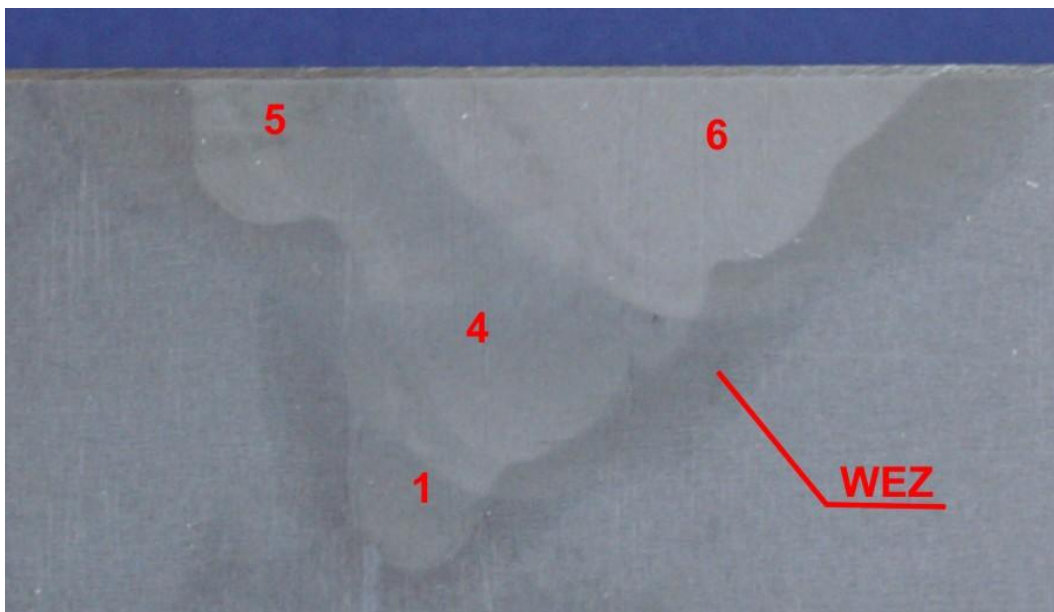


Bild A-14 Probe 03 - Ansicht oberer Teil der Schweißnaht

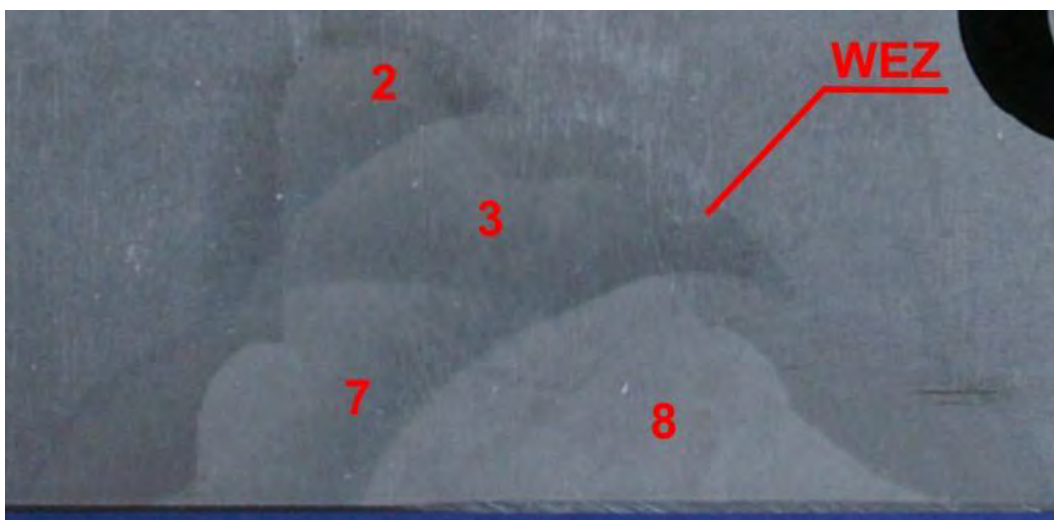


Bild A-15 Probe 03 - Ansicht unterer Teil der Schweißnaht

Probe 04:

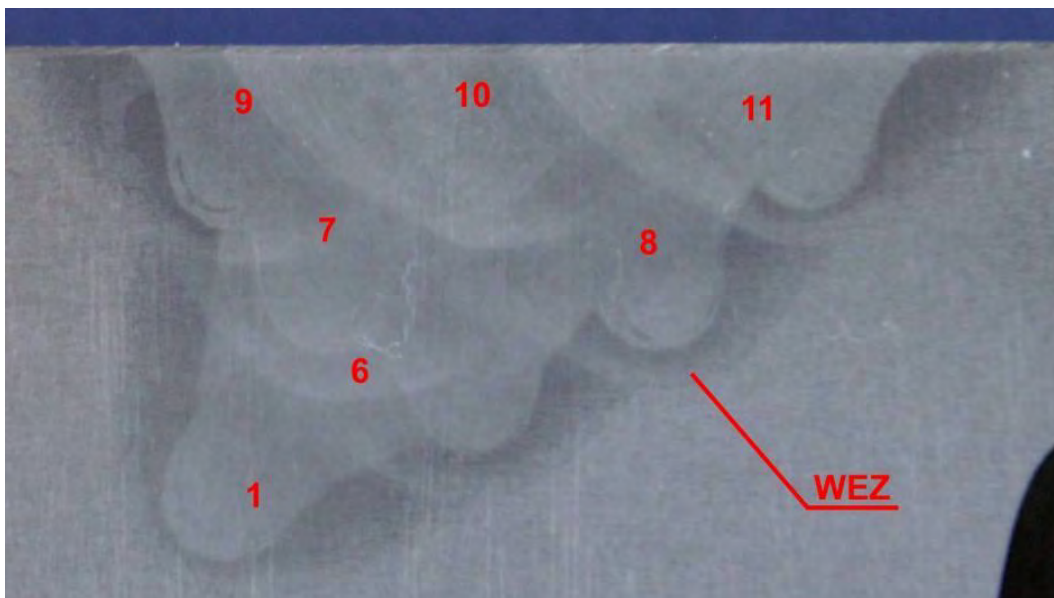


Bild A-16 Probe 04 - Ansicht oberer Teil der Schweißnaht

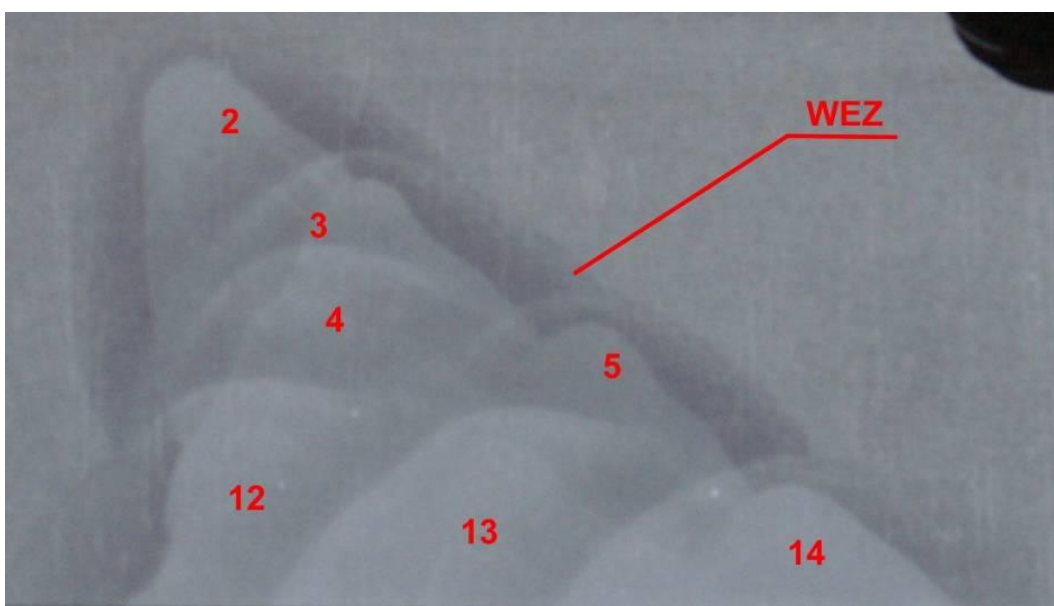


Bild A-17 Probe 04 - Ansicht unterer Teil der Schweißnaht

Anhang B Hauptversuche

A0/A1

A02

A03



SWIADECTWO ODBIORU
 Inspection certificate/Abnahmeprüfzeugnis
 wg. EN 10204/05-3.1

Nr. 2909/AT/10/1-1

Date: 2010.05.13

ISD TRADE SP. Z O.O. SP. K.

02-627 WARSZAWA UL. NARUSZEWICZA 9

A06 Odbiorca/Customer/Empfänger



A05 Wystawca dokumentu/Originator of the dok./Aussteller der Bescheinigung
 Kontrola Jakości/Quality Department/QS-Abteilung.
 42-200 Częstochowa ul. Kucelińska 22
 Tel. (034) 323 78 87, (034) 323 88 78 Fax: (034) 323 0289

A08 Specyfikacja/Specification/Spezifikation N°: 10/05 0133

Lot N°:

A08 Nr potwierdzenie.Huty/ Our Confirm. N° /Unsere Auftrags N°.

A07 Kontrakt / to Order Note / zu Lieferanzeige N°

B09+11 Wymiary/ Dimensions/Abmessungen:

016-8156

3100170

40.00 * 2000 * 6000
 B03 Przep. odb./ wym. dod. Terms of Deliv. a./or Official Regul. Lieferbedingungen u./o. amtliche Vorschriften

B01 Produkt /Product/Erzeugnis:

BLACHA GRUBA / GROBBLECH / STEEL PLATES
 B02 Gatunek/Grade/Güte:

EN 10029/91 Kl. A

S355J2+N

EN 10025-2:2004

B04 Stan dostawy/State of Delivery/Lieferzust.

AD2000-W1

N

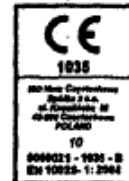
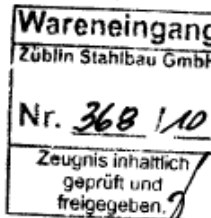
B07 Nr wytopu Heat N° Schmelze Nr	C00/C02 Kier. 1 nr próby Sample N° and orientat Probe N° and richting	C11 Granica Pier. Yield stress Stressy MPa Re	C12 Granica wytrzymał. Tensile Strength Zagrzętko- siła MPa Rm	C13 Wydł. Elong. Bruch- Dehnung- % A5	C40 - C49		Próba udarowości / Impact test / Kerbschlag test			C43 Wart Średnia Average Mittel wert	C30/C32 Twardość Hardness Test Härte HBW	
					C45 Energia praca Energy work Kerbschlag Arbeit	C46 Kier. Próby Sample orientat Probe Lage	C49/C41 Typ próby Sample type Typ Probeart	C48 Temp. °C	C42 Udam. Impact value Kerb Schlag			C47 Udam. Impact value Kerb Schlag
569983	91249	352	531	26.0	J	L	IV	-20	50	46	48	48

Badanie mechaniczne i technologiczne / Prüfung der mechanische und technologische prüfungen / Mechanical and technological test / - temp. +20°C

B07 Nr wytopu Heat N° Schmelze N°	B08 St. Pos. Taf.	B13 Masa Weight Masse (Mg)	C71 - C92 Analiza chemiczna [%] / Chemical Composition [%] / Chemische Zusammensetzung [%]														
			C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	N2	V	Nb	Ti	Ceq
569983	4	15.072	0.15	1.40	0.32	0.013	0.014	0.04	0.107	0.02	0.18	0.030	0.0070	0.004	0.002	0.002	0.42

Badanie mechaniczne i technologiczne / Prüfung der mechanische und technologische prüfungen / Mechanical and technological test / - temp. +20°C

BAF-569983: 91248-1,2; 91249-1,2



Plaskosc blach wg./ Ebenheit gen./ Flatness acc. EN 10029/91 cl.N
 Blachy wg EN 10163-2 kl.A podkl.1 / Plates acc.EN 10163-2 cl.A,Subclass 1
 Badanie radioaktywnosci - wynik < 0,1 Bq/g / Radioactivity value < 0,1 Bq/g
 The product has got Declaration of Conformity acc.to directive 89/106/EBC for construction products.
 1002105,842/H20-5401876547,Thyssen

Firma hat Qualitätssicherungs-System für Werkstoffhersteller nach Richtlinie 97/23/BG Zert.-Nr.01 2004 PL/Q-04 0004

Q- Poprawca/Quer/ Trazersre	B06	202	203
L- Wzrostki/Länge/ Loughthead	Znak producenta/Mark of the Manufacturer/Zeichen d. Herstellwerk	St. Strzecki	STEMPEL Q
F- Stopa/Bottom/Fluss	Gatunek /Grade/Güte, Nr pasma / Plate N° / Wzrostki N°, Nr wytopu / Heat N°/Schmelze N°.	Specjalista /Specialist/Qualitätsinspektor/ Der Werkstoffverständige	04
K- Głowa/Top/Kopf	Znak IKJ/Quality Control's Stamp / Zeichen d. Technische Kontrolle Znak Inspektora / Inspector's Stamp / Zeichen d. Sachverständigen		

Niniejszym potwierdzam, że dostawa została skontrolowana i odpowiada warunkom zamówienia/Wa hereby certify, that the material described above has been tested and complies with terms of the order contract./ Es wird bestätigt, dass die Lieferung geprüft wurde und den Voraussetzungen bei der Bestellung entspricht.

HUTA CZĘSTOCHOWA SP. Z O.O. JEST WYTWÓRCĄ, WZANĄCZĄ PRZEZ URZĄD DOZORU TECHNICZNEGO ODDZIAŁ CZĘSTOCHOWA NIEJ44-43-48.
 Badanie radioaktywności-wynik < 0,1 Bq/g / Radioactivity value < 0,1 Bq/g



Durch die DAP Deutsches Akkreditierungssystem
Prüfwesen GmbH nach DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium

DAP-PL-2512.00

CEWUS Chemnitzer Werkstoff- und Oberflächentechnik GmbH

CEWUS Werkstoffprüfung, Neefestraße 80a, 09119 Chemnitz, Tel. 0371 651180151, Fax: 0371 651180 150, E-Mail: hans.thiemann@cewus.de

Thyssen Krupp Schulte GmbH
Niederlassung Dresden
Kötitzer Str. 110
01445 Radebeul

BESCHEINIGUNG
certificate
Certificate

zu Lieferanzeige Nr. / to Delivery Note: _____ vom / dated: 01.07.2010		
Zeichen des Herstellerwerkes/Mark of the Manufacturer: _____ Zeichen des Sachverständigen / Inspector's Stamp: (WP1)		
Besteller / Purchaser:	Bestell-Nr./ Order-No.:	Prüfdatum / Test Date:
Frau Lorenz	1407891386	02.07.2010
Unsere Auftrags-Nr./ Our Order No:	Unsere Abteilung/ Our Department	Hausruf/ Phone.:
1308/10	WP	0371/ 651180151
Erzeugnisform / Product:	Lieferbedingungen / Terms of Delivery/Blechkennzeichnung:	
GBI. 40 mm, Probestück	Charge: 569983, Probe -- 1, 2)	
Werkstoff / Lieferzustand: Quality / Condition of Delivery:	Lieferbedingungen u./o. amtl. Vorschriften/Blechkennzeichnung Terms of Delivery and/ or Official Regulations:	
S355J2+N¹⁾	EN 10025-2	

Mitgeltende Normen: DIN 1319-1:1996;
1) - nach Angaben des Lieferers
2) - Umstempelkennzeichen des Lieferers :-

Aufschweißbiegeversuch nach SEP 1390 : 1996

Geltungsbereich: Re [235-355] MPa, a ≥ 30mm

Pos.	a [mm]	Lp x b [mm]	n	Probenbruch	Ergebnis
1	40	440x200	6	nein	bestanden

- 2 - Erzeugnisdicke, thickness of product
- 3 - Probenabmessung, sample measurement
- 4 - Anzahl [n] der Anrisse, die sich bis zur Schmelzlinie ausgebreitet haben
- 5 - Probe vor Erreichen des Biege winkels 60° gebrochen
- 6 - Ergebnis der Prüfung bestanden / nicht bestanden
result of the test test passed / passed not

Wareneingang
Züblin Stahlbau GmbH
Nr. 368/10
Zeugnis inhaltlich
geprüft und
freigegeben.

Es wird bestätigt, dass das Probestück geprüft wurde
und die Anforderungen erfüllt hat.

We hereby certify, that the sample is proved and
that the above mentioned data are correctly.

A = Anfang/Beginning, E = Ende/End, F = Fuß/Bottom, K = Kopf/Top
l = längs/longitudinal, q = quer/transverse, t = tangential
r = radial, z = senkrecht/verticale

100_30

Das Prüfprotokoll darf ohne schriftliche Genehmigung des Prüflabors nicht ausserhalb der Vertriebsgebiete weitergegeben werden.
It is not allowed to copy this inspection certificate or parts of the certificate without written consent given by CEWUS laboratory

H. Thiemann
Leiter des Prüflaboratoriums / Inspector
Dipl.-Ing. (TU) H. Thiemann





Durch die DAP Deutsches Akkreditierungssystem
Prüfwesen GmbH nach DIN EN ISO/IEC 17025
akkreditiertes Prüflaboratorium

DAP-PL-2512.00

CEWUS Chemnitzer Werkstoff- und Oberflächentechnik GmbH

CEWUS Werkstoffprüfung, Neefestraße 80a, 09119 Chemnitz, Tel. 0371 651180151, Fax: 0371 651180 150, E-Mail: hans.thiemann@cewus.de

Wareneingang
Züblin Stahlbau GmbH
Nr. 368 / 10
Zeugnis inhaltlich
geprüft und
freigegeben.

BESCHEINIGUNG

Certificate
Certificate

Thyssen Krupp Schulte GmbH
Niederlassung Dresden
Kötitzer Str. 110
01445 Radebeul

zu Lieferanzeige Nr. / to Delivery Note: _____
vom / dated: 30.06.2010

Zeichen des Herstellerwerkes/Mark of the Manufacturer: _____
Zeichen des Sachverständigen / Inspector's Stamp: (WP1)

Besteller / Purchaser:	Bestell-Nr./ Order-No.:	Prüfdatum / Test Date:
Frau Perleß	1407888086	01.07.2010
Unsere Auftrags-Nr./ Our Order No.:	Unsere Abteilung/ Our Department	Hausruf/ Phone.:
1297/10	WP	0371/ 651180151
Erzeugnisform / Product:	Lieferbedingungen / Terms of Delivery/Blechkennzeichnung:	
Pos.1: GBI. 35 mm, Probestück	Charge: 569434, Probe -- 1, 2)	
Pos.2: GBI. 40 mm, Probestück	Charge: 569983, Probe 91248-2 1, 2)	
Pos.3: GBI. 50 mm, Probestück	Charge: 12933, Probe 627394-002 1, 2)	
Werkstoff / Lieferzustand: Quality / Condition of Delivery:	Lieferbedingungen u./o. amtl. Vorschrift/Blechkennzeichnung Terms of Delivery and/ or Official Regulations:	
Pos. 1 bis 3: S355J2+N 1)	EN 10025-2	

Mitgeltende Normen: DIN 1319-1:1995, EN 10164, DIN EN ISO 6892-1; EN 10045, SEP 1390

- 1) - nach Angaben des Lieferanten
- 2) - Umstempelkennzeichen des Lieferanten: "R13"

Pos. Item	Einschnürung reduction of stress		Einschnürung reduction of stress	
	Z ₁ [%]	Z ₂ [%]	Z ₃ [%]	Z ₄ [%]
2	34,7	17,2	26,0	26 ± 8,8
3	68,6	69,8	68,6	69 ± 0,6

Pos. 2, 3: Zugversuch nach DIN EN 10164 : 2004: **Z25 erfüllt**

Pos. 2, 3: Nachweis für US-Prüfung: CEWUS Prüfbericht Nr. 1297/10 vom 01.07.2010.

Pos. 2, 3: Neue Blechkennzeichnung Stahl EN 10025 – S355J2 +N + EN 10164 – Z25

Aufschweißbiegeversuch nach SEP 1390 : 1996

Geltungsbereich: Re (235-355) MPa, a2 30mm

Pos.	a [mm]	Lp x b [mm]	n	Probenbruch	Ergebnis
1	35	410x200	5	nein	bestanden
2	40	440x200	5	nein	bestanden
3	50	500x200	6	nein	bestanden

- 2 - Erzeugnisdicke, thickness of product
- 3 - Probenabmessung, sample measurement
- 4 - Anzahl [n] der Anröße, die sich bis zur Schmelzlinie ausgebreitet haben
- 5 - Probe vor Erreichen des Biegewinkels 80° gebrochen
- 6 - Ergebnis der Prüfung bestanden / nicht bestanden
result of the test passed / passed not

Pos Item	Probenlage/ Pos. of sample	Kerbschlagarbeit nach DIN EN 10 045 a _y [J] / Impact Value Sort. (ISO-V-Probe)					
		1.	2.	3. Anforderung	Mitte/ Average ±27	Bei / at °C -28	Bemerkungen / Remarks
3	I	187	234	222	214 ± 24	-21	erfüllt

Es wird bestätigt, dass die Probestücke geprüft wurden
und die Anforderungen erfüllt haben.
We hereby certify, that the sample is proved and
that the above mentioned data are correctly.

A = Anfang/Beginning, E = Ende/End, F = Fu/Bottom, K = Kopf/Top
l = längs/longitudinal, q = quer/transverse, t = tangential
r = radial, z = senkrecht/verticale

H. Thiemann
Leiter des Prüflaboratoriums / Inspector
Dipl.-Ing. (TU) H. Thiemann (WP1)

Anhang B.2 Materialzeugnisse für die Proben DHY-N1-2 bis DHY-N6-2

Die die Probekörper betreffende Material Chargennummer des 40 mm-Blechs ist 802837. Es handelt sich hierbei um einen S355J2+N.

03 Jan 2011 15:04 HP LASERJET FAX S. 1

DAP Deutscher Akkreditierung Rat
 Durch die DAP Deutsches Akkreditierungssystem
 Prüfwesen GmbH nach DIN EN ISO/IEC 17025
 akkreditiertes Prüflaboratorium

DAP-PL-2512.00
CEWUS Chemnitzer Werkstoff- und Oberflächentechnik GmbH
 CEWUS Werkstoffprüfung, Neosenträße 80a, 09118 Chemnitz, Tel: 0371 651180161, Fax: 0371 651180160, E-Mail: hars.thiemann@cewus.de

Thyssen Krupp Schulte GmbH
 Niederlassung Dresden
 Költzner Str 110
 01445 Radebeul

Wareneingang
 Züblin Stahlbau GmbH
 Nr. 51M
 Zeugnis inhaltlich geprüft und freigegeben.

BESCHEINIGUNG
 Certificate
 Certificate

zu Lieferanzuge Nr. / to Delivery Note: _____
 vom / dated: 30.12.2010
 Zeichen des Herstellerwerkes/Mark of the Manufacturer: _____
 Zeichen des Sachverständigen / Inspector's Stamp: (WP1)

Besteller / Purchaser: **Herr Koban**
 Unsere Auftrags-Nr. / Our Order No.: **0002/11**
 Erzeugnisform / Product: **Pos.1: GBl. 30 mm, Probestück**
Pos.2: GBl. 30 mm, Probestück
Pos.3: GBl. 40 mm, Probestück
Pos.4: GBl. 40 mm, Probestück
 Werkstoff / Lieferzustand: **Pos.1 bis 2: S235JR+N ¹⁾**
Pos.3 bis 4: S355J2+N ¹⁾
 Qualität / Condition of Delivery: **EN 10025-2**
EN 10025-2
 Mitgeltende Normen: DIN 1319-1:1995, EN 10164, DIN EN ISO 6892-1, SEP 1390
 1) - nach Angaben des Lieferanten
 2) - Umstempelkennzeichen des Lieferanten "R-28"

Bestell-Nr / Order-No.: **1408637336** Prüfdatum / Test Date: **03.01.2011**
 Unsere Abteilung / Our Department: **WP** Hausruf / Phone: **0371/ 651180161**
 Lieferbedingungen / Terms of Delivery/Blechkennzeichnung: **Charge: Y63404, Probe 580524-001 ^{1, 2)}**
Charge: Y63404, Probe 580526-002 ^{1, 2)}
Charge: 802837, Probe D1 ^{1, 2)}
Charge: 802837, Probe D3 ^{1, 2)}
 Lieferbedingungen u./o. amtliche Vorschriften / Blechkennzeichnung
 Terms of Delivery and/ or Official Regulations: **EN 10025-2**
EN 10025-2

Pos. Item	Einschnürung reduction of stress		Einschnürung reduction of stress	
	Z ₁ [%]	Z ₂ [%]	Z ₃ [%]	Z ₄ [%]
1	22,6	24,3	31,1	26 ± 4,6
2	20,8	29,4	24,3	25 ± 4,3
3	62,8	66,4	80,3	63 ± 3,0
4	53,8	64,0	67,7	59 ± 5,2

Zugversuch nach DIN EN 10164: 2004: **Pos. 1 und 2: Z 25 nicht erfüllt**
Pos.3 und 4: Z 25 erfüllt

Nachweis für US-Prüfung CEWUS Prüfbericht 0002/11 vom 03.01.2011
Pos.3 und 4: Neue Blechkennzeichnung Stahl EN 10025 - S355J2 +N + EN 10164 - Z 25

Aufschweißblegversuch nach SEP 1390 : 1996
 Geltungsbereich: Re (235-355) MPa, a ≥ 30mm

Pos.	a [mm]	Lp x b [mm]	n	Probenbruch	Ergebnis
4	40	440x200	6	nein	bestanden

2 - Erzeugnisdicke, thickness of product
 3 - Probenabmessung, sample measurement
 4 - Anzahl [n] der Proben, die sich bis zur Schmelzlinie ausgebreitet haben
 5 - Probe vor Erreichen des Biegewinkels 60° gebrochen
 6 - Ergebnis der Prüfung bestanden / nicht bestanden
 result of the test passed / passed not

Es wird bestätigt, dass die Probestücke geprüft wurden und die angegebenen Werte erreicht haben.
 We hereby certify, that the sample is proved and that the above mentioned data are correctly

A = Anfang/Beginning, E = Ende/End, F = Fuß/Bottom, K = Kopf/Top
 l = längs/longitudinal, q = quer/transverse, t = tangential
 r = radial, z = senkrecht/verticale

Das Prüfprotokoll darf nicht ohne Genehmigung des Prüfabwärters (WP) aus dem Prüflabor entfernt werden.
 The protocol shall not be removed from the laboratory without the approval of the laboratory technician (WP).

H. Thiemann
 Leiter des Prüflaboratoriums / Inspector
 Dipl.-Ing. (TU) H. Thiemann

WP1

03 Jan 2011 15:04

HP LASERJET FAX

S. 2

CEWUS		Ultraschallprüfbericht Ultrasonic Report				Blatt 1 von 1 Page of	
						Bestell - Nr. Ref. No. 1408637336	
						Auftrag - Nr. Order - No. 0002/11	
Erstes Chemnitzer Werkstoffprüfungs- und Schadensanalyselabor		Wareneingang				Einsatzort Working place Radebeul	
Durch die DAP Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH nach DIN EN ISO 9001:2008 im Chemnitzer Laboratorium							
CEWUS Chemnitz Werkstoff- und Oberflächentechnik GmbH Nachstraße 80a, 09119 Chemnitz						Tel: (0371) 85 11 80-161 / Fax: (0371) 85 11 80-160 email: Hans.Daemmer@cewus.de	
Auftraggeber Customer ThyssenKrupp-Schulte GmbH Niederlassung Dresden Kötitzer Straße 110 01445 Radebeul		z Hd: Herr Koban		Projekt Zweck Auftrag Exam. object Zeugnis inhaltlich Flachzone (Flachzonenprüfung)		Hersteller Manufacturer /	
Angegeben zum Objekt Data relating to the object		Werkstoff Material Pos.1 und 2: S235JR+N Pos.3 bis 7: S355J2+N		Oberflächenzustand Surface condition gewalzt rolled		Prüfbereich Exam. Range Flach von einer Seite flat from one major side	
Prüftechnische Daten Data relating to the examination		Prüfvorschrift - Klasse Exam. spec. - class DIN EN 583-1,-2,-5; 1330-4; 12888-3 (1) DIN EN 10166		Bewertung nach Spez., Klasse Evaluation Spec., class DIN EN 10160 / S1 / E1			
Abweichung Deviation /		Prüfung Exam. Extent Flachzone - nach DIN EN 10160, § 9.2.1 (# 200) Randzone - nach DIN EN 10160, § 8.3; Tab.2		US-Gerät Equipment type USM 35X			
Regelgrenze Recording threshold		Flachzone - S ≥ 100 mm ² Randzone - L ≥ 25 mm		Einbauposition Sonic position Senkrecht perpendic.		Kabelänge Cable length 2,0 m	
Justiervorgabe und Empfindlichkeit adjustment and sensitivity		Verdichtungs- coupling media Wasser Water		Gegengewicht Equipm. calibr. /		Vergleichskörper Reference block /	
Prüfprotokolle Proto Data		PK Lfd. Nr. Prüf-Nr. No.		Typ Type		Hersteller Manufacturer	
		Ent.-Just. S PA WPA		K K1 K2 RW		VL AVG _{90°} AVG _{45°}	
		D _{max} [mm]		K ₀ [dB/m]		G ₀ [mm]	
		V ₁ [dB]		ΔV ₁ [dB]		V ₂ [dB]	
		AVG _{90°}		AVG _{45°}		Bemerkung Remark	
		1.		SEB 4T		KK	
		2.		SEB 4T		KK	
		3.		SEB 4T		KK	
		4.		SEB 4T		KK	
		5.		SEB 4T		KK	
Lfd.Nr. No.		Prüfabschnitt Section examined		PK Lfd. Nr. Prüf-Nr. No.		Ungängen Error location	
Proben-Nr. / Bl.Nr. specimen no./plate no.		Chargen Nr. Heat No.		Abmessungen Dimension		Abstand vom Bez.-pkt. Specimen ref. point	
						Tiefenlage Depth	
						Fläche Area	
						Bewertung Evaluation	
						Bemerkung Remark	
1.		S85228-001		Y63876		15 2500 6000	
2.		2BV.1617.03/B		026671		20 2000 12000	
3.		585429-001		Y14230		25 2000 12000	
4.		580524-001		Y63404		30 2000 6000	
5.		580525-002		Y63404		30 2000 6000	
6.		D1-101		802837		40 2000 6000	
7.		D3-101		802837		40 2000 12000	
Ende der Eintragung <i>end of listing</i>							
An den Ecken mit WP4 gestempelt.							
Beurteilung Appraisal Die geprüften Positionen entsprechen den in der oben genannten Prüfvorschrift. The examined positions are in conformity with specifications mentioned.							
Dokumentation des Fehlers Representation of defect Bezugspunkt und Abweichungsrichtung kennzeichnen mit Reference point and deviation direction mark with							
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>VL - Vergleichsmittel (DAC) DAC-method</p> <p>RL - Referenzniveau (AVG) reference level</p> <p>AVG - Mittelwert (AVG) AVG-method</p> <p>K1/K2 - Konstanten 1 oder 2 K₀ - Rückwertwert</p> </div> <div> <p>AV₁ - Transferrichter result correction</p> <p>AV₂ - Anisotropiekorrektur coupling</p> <p>V₁ - Regeldifferenzierung evaluation</p> <p>V₂ - Zone registrierfähigkeit</p> <p>AV₀ - erhaltene AV₀ value</p> </div> </div>							
Ort Place Datum Date Unterschrift Signature Prüfer Examiner		Chemnitz 03.01.2011		Chemnitz 03.01.2011		Chemnitz 03.01.2011	

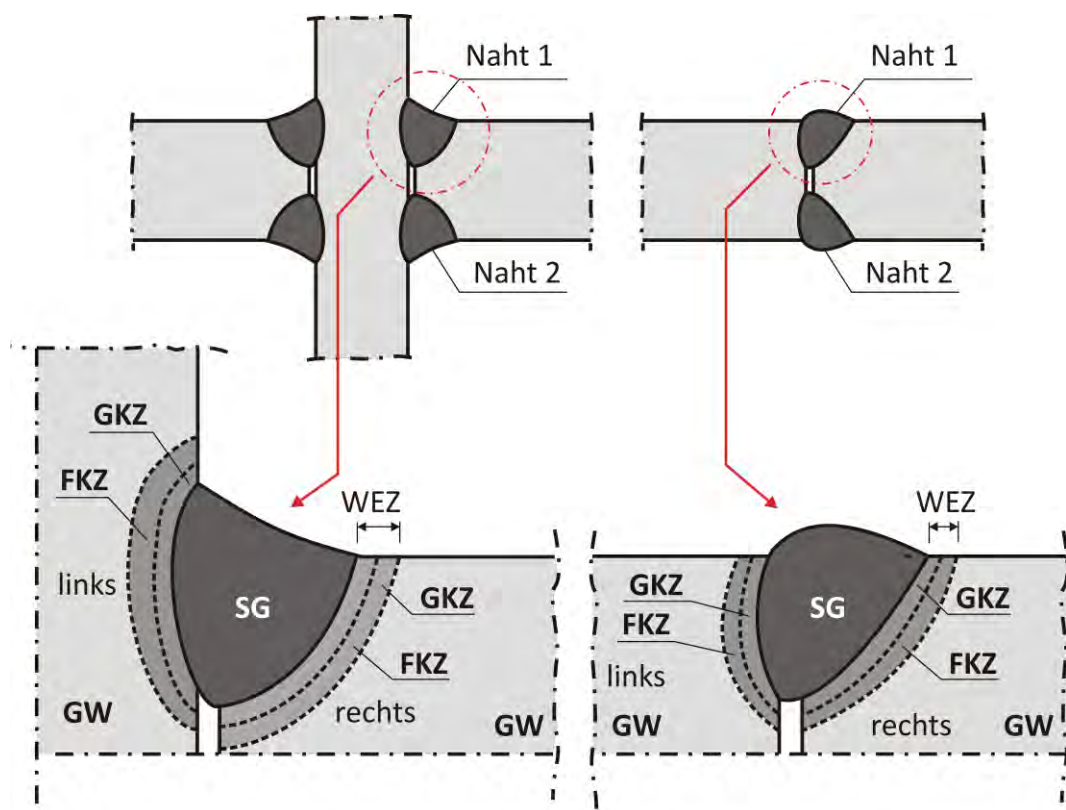
WZP

Anhang B.3 Metallographische Untersuchungen

Die Untersuchungen betreffen die Versuchskörper nach Fertigung der Proben. Es wurden metallographische Analysen

- des Grundwerkstoffs,
- der Wärmeeinflusszone,
- der Grobkornzone,
- der Feinkornzone und
- des reinen Schweißguts

durchgeführt. Die Kennzeichnung der Positionen, an denen die metallographischen Untersuchungen durchgeführt wurden, sind in Bild B-1 dargestellt.



GW: Grundwerkstoff

WEZ: Wärmeeinflusszone

SG: Schweißgut

GKZ: Grobkornzone

FKZ: Feinkornzone

Bild B-1 Kennzeichnung der Positionen für Gefügeuntersuchungen

Probe DHY-N3:

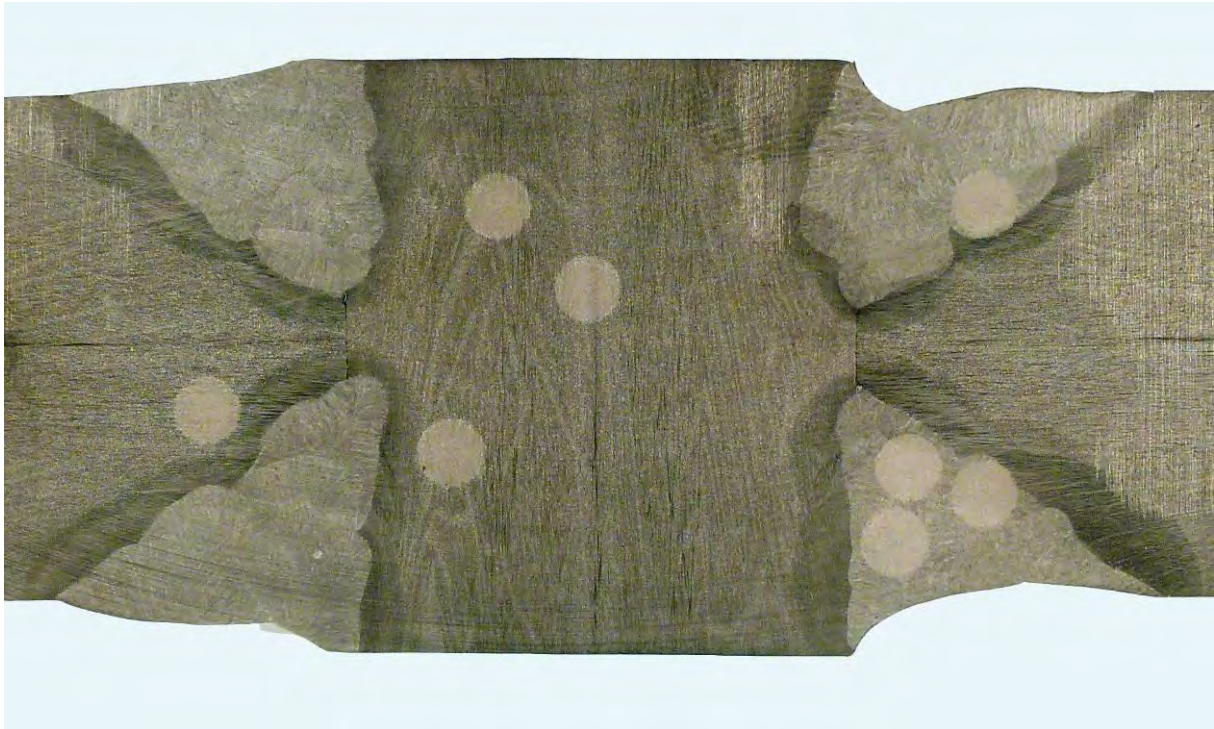
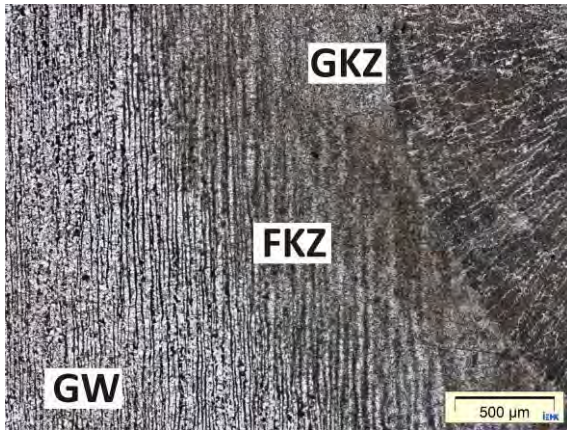
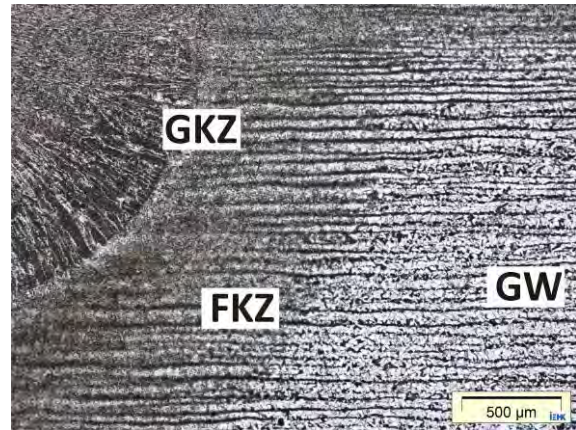


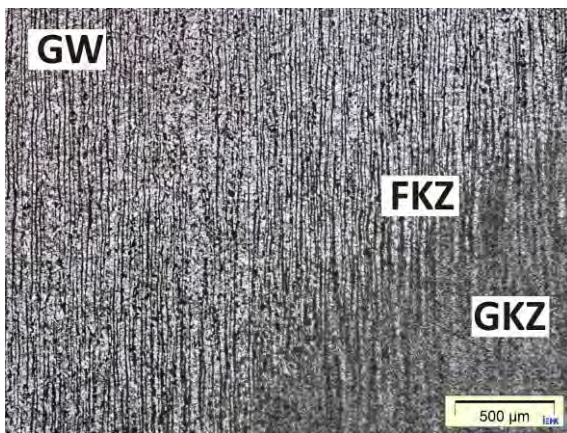
Bild B-2 **Probe DHY-N3 – Makroschliff an Kreuzstoßverbindung**



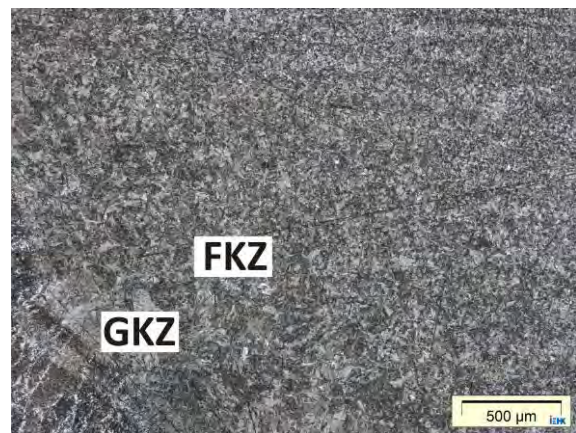
Naht 1: WEZ links



Naht 1: WEZ rechts

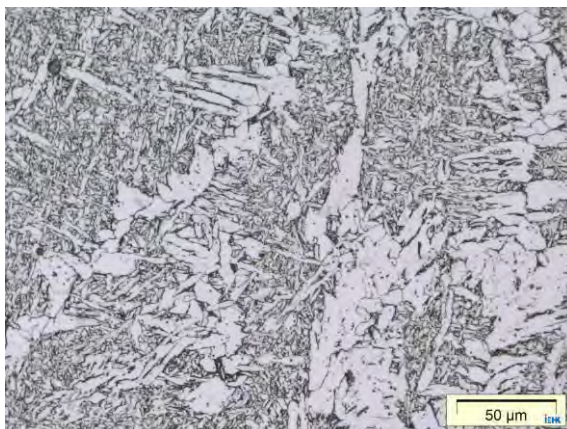


Naht 2: WEZ links

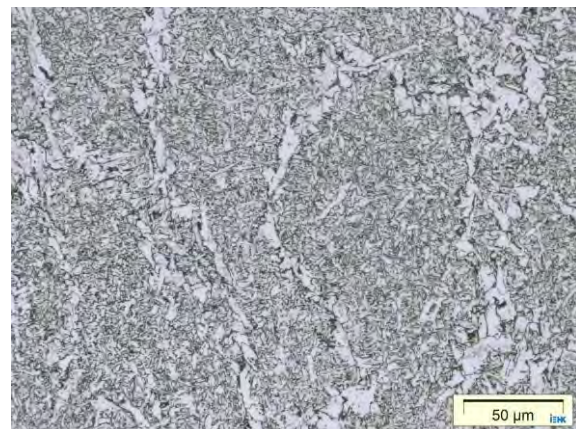


Naht 2: WEZ rechts

Bild B-3 Probe DHY-N3 – Übersicht der WEZ bei 50-facher Vergrößerung

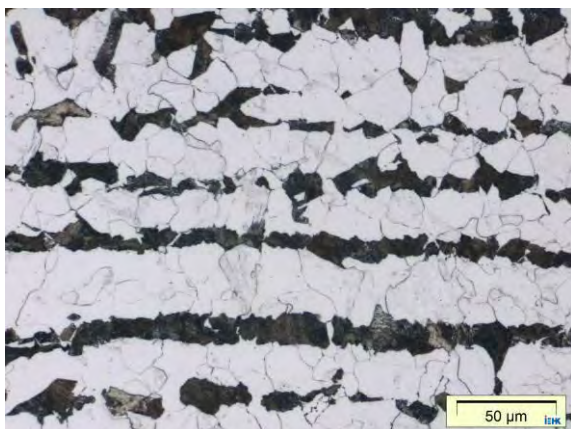


Naht 1: Schweißgut

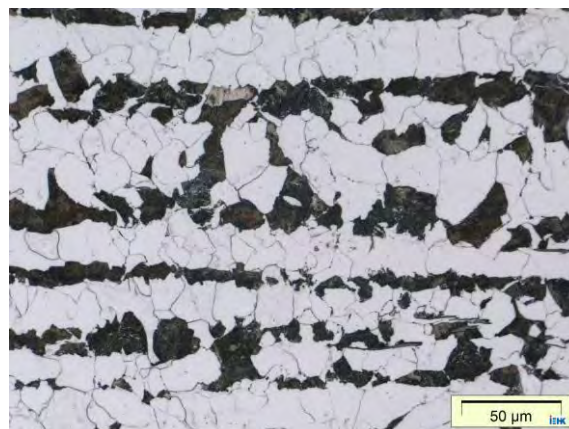


Naht 2: Schweißgut

Bild B-4 Probe DHY-N3 – Gefüge des Schweißguts bei 500-facher Vergrößerung

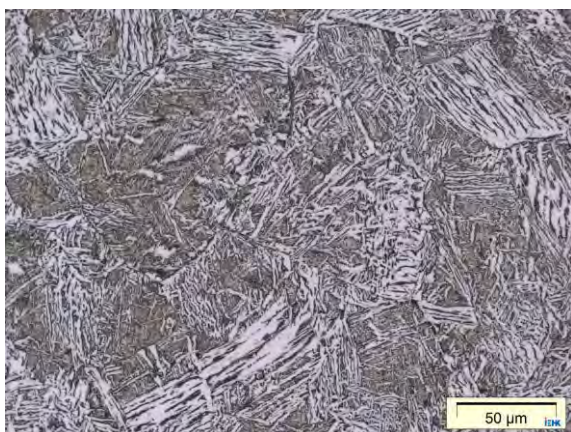


Naht 1: Grundwerkstoff rechts

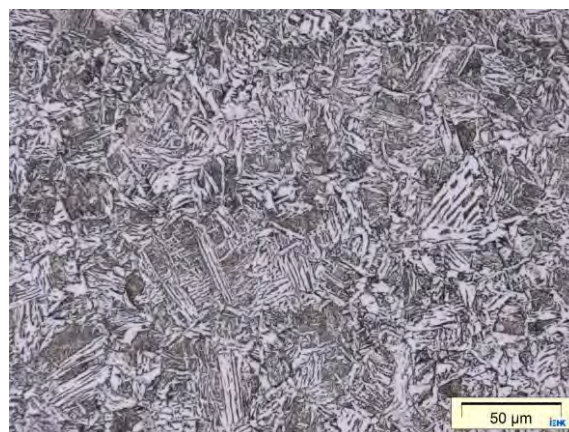


Naht 2: Grundwerkstoff rechts

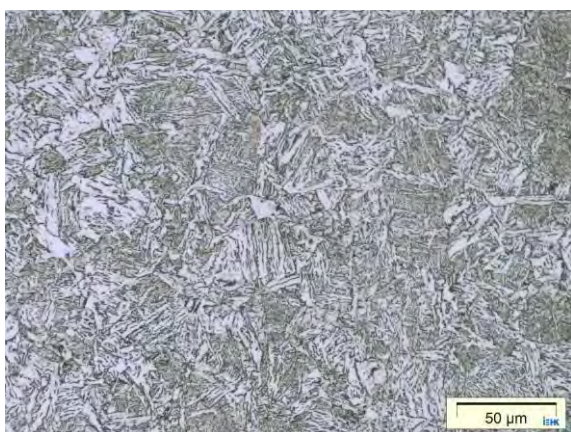
Bild B-5 Probe DHY-N3 – Gefüge des Grundwerkstoffs bei 500-facher Vergrößerung



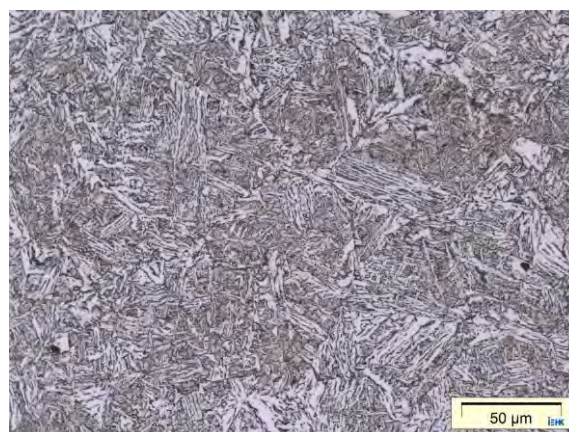
Naht 1: GKZ links



Naht 1: GKZ rechts

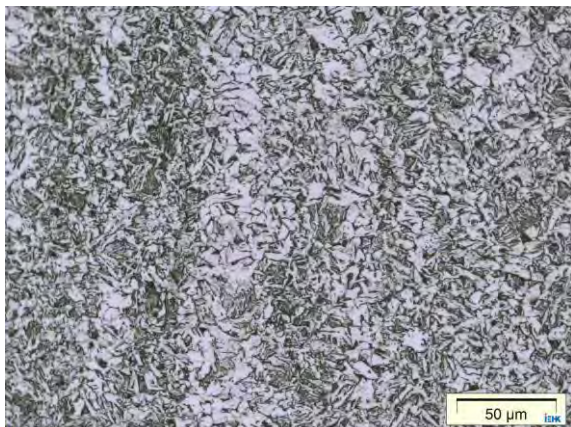


Naht 2: GKZ links

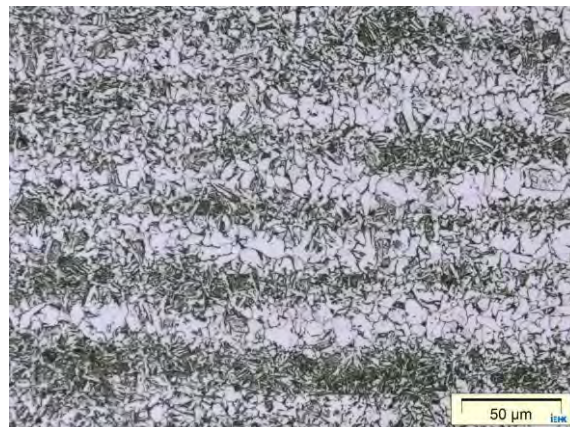


Naht 2: GKZ rechts

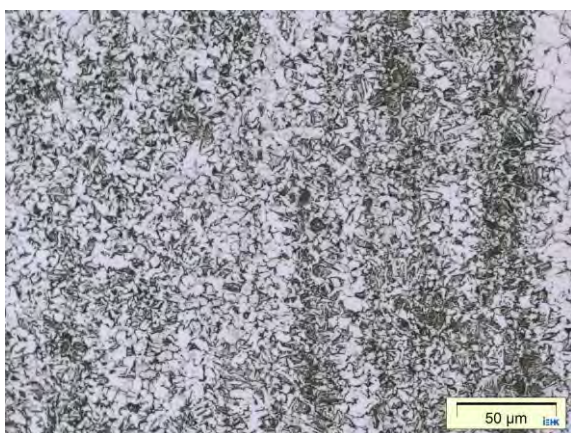
Bild B-6 Probe DHY-N3 – Gefüge der Grobkornzone bei 500-facher Vergrößerung



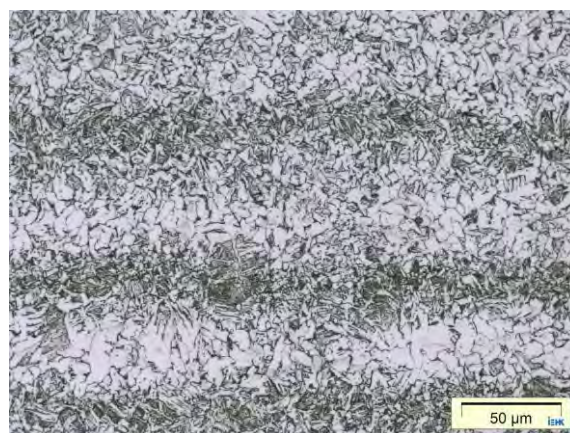
Naht 1: FKZ links



Naht 1: FKZ rechts



Naht 2: FKZ links



Naht 2: FKZ rechts

Bild B-7 **Probe DHY-N3 – Gefüge der Feinkornzone bei 500-facher Vergrößerung**

Probe DHY-N6:

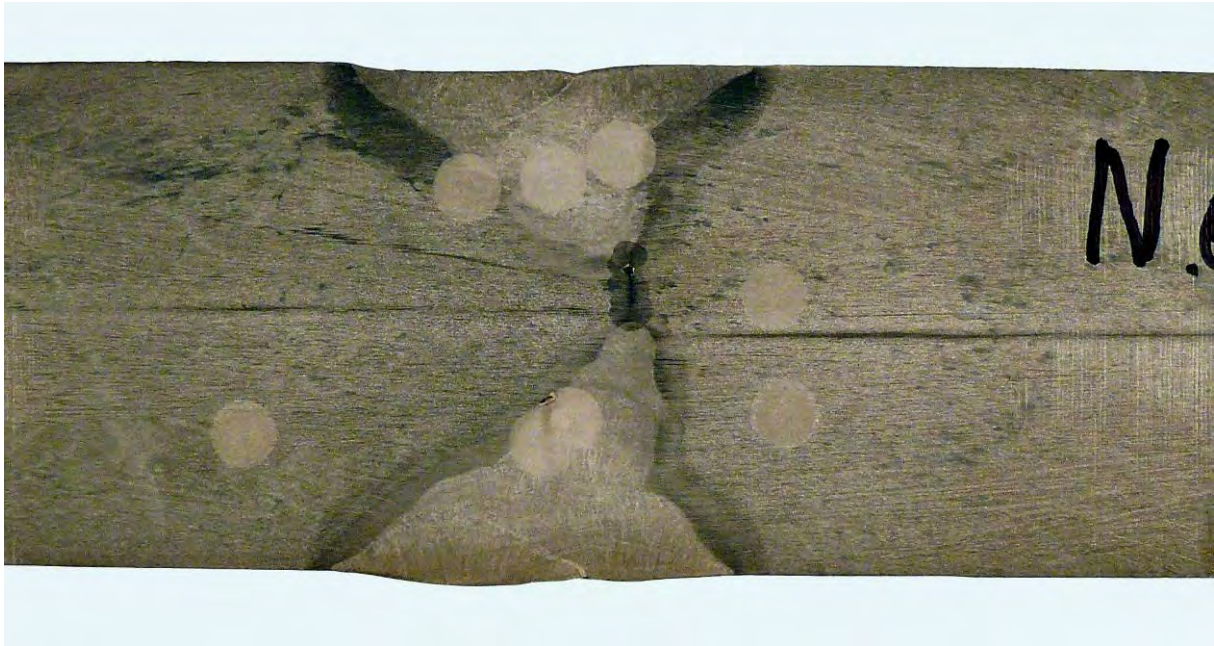
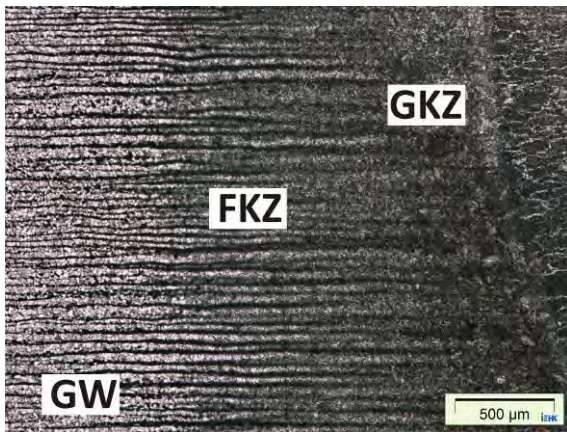
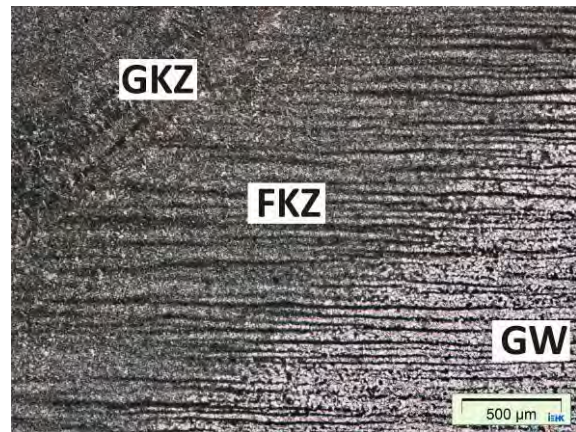


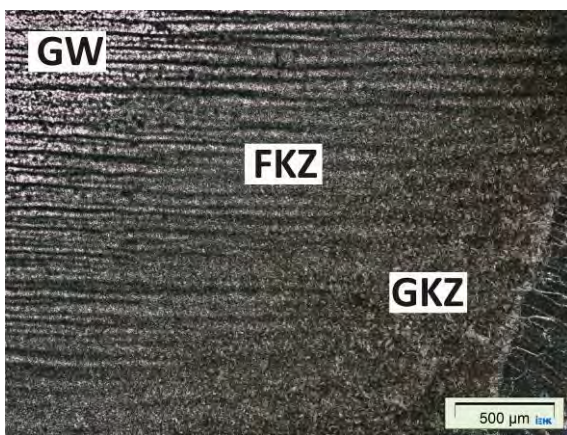
Bild B-8 **Probe DHY-N6 – Makroschliff an Stumpfstoßverbindung mit Öffnungswinkel 50°**



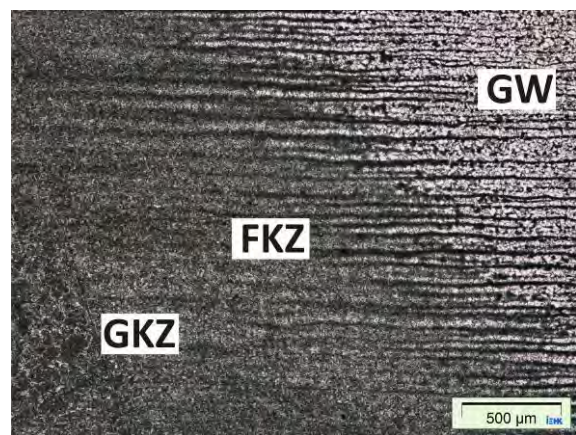
Naht 1: WEZ links



Naht 1: WEZ rechts

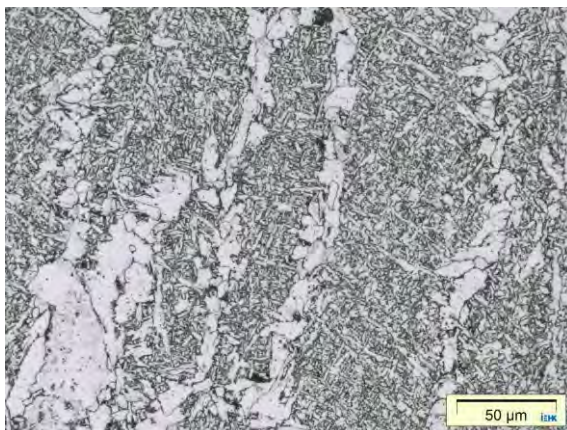


Naht 2: WEZ links

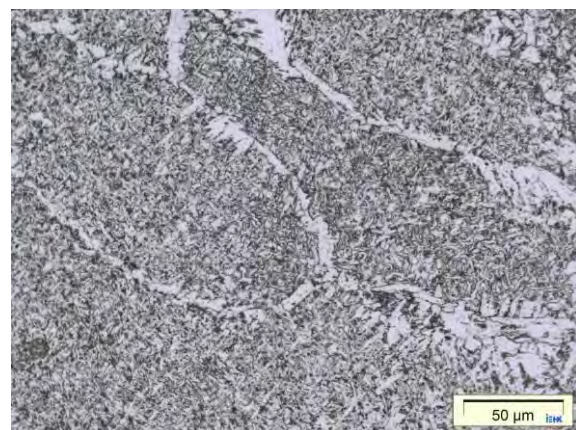


Naht 2: WEZ rechts

Bild B-9 Probe DHY-N6 – Übersicht der WEZ bei 50-facher Vergrößerung

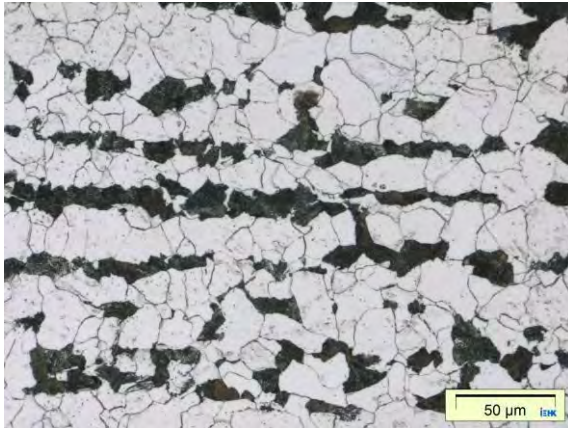


Naht 1: Schweißgut

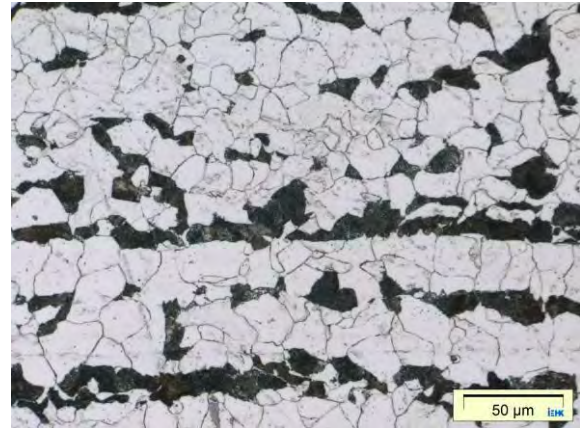


Naht 2: Schweißgut

Bild B-10 Probe DHY-N6 – Gefüge des Schweißguts bei 500-facher Vergrößerung

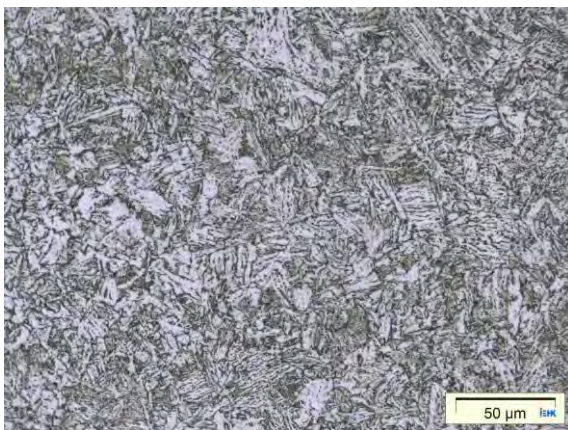


Naht 1: Grundwerkstoff links

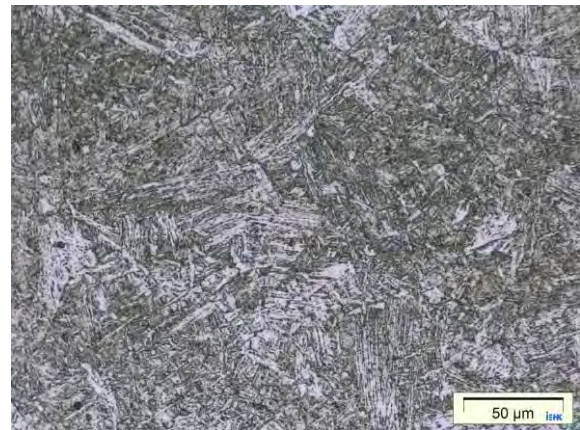


Naht 2: Grundwerkstoff rechts

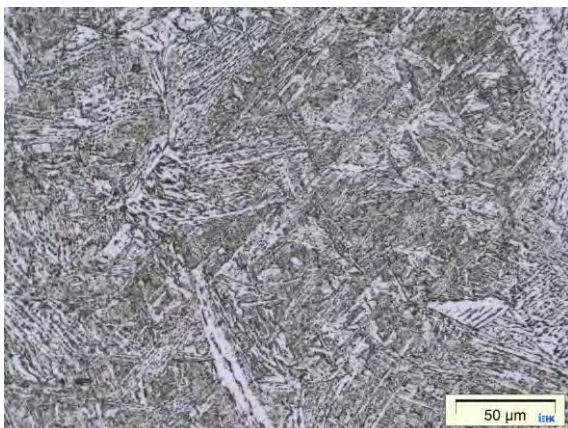
Bild B-11 Probe DHY-N6 – Gefüge des Grundwerkstoffs bei 500-facher Vergrößerung



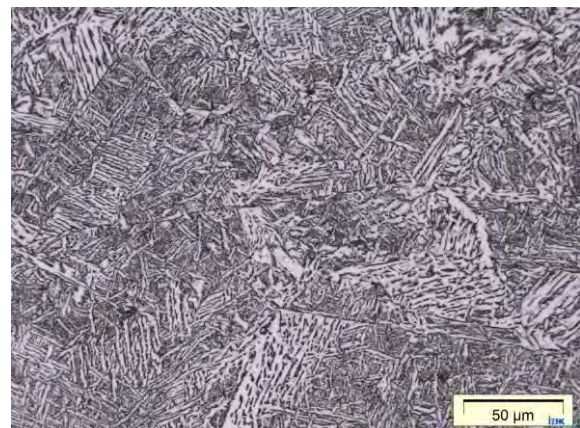
Naht 1: GKZ links



Naht 1: GKZ rechts

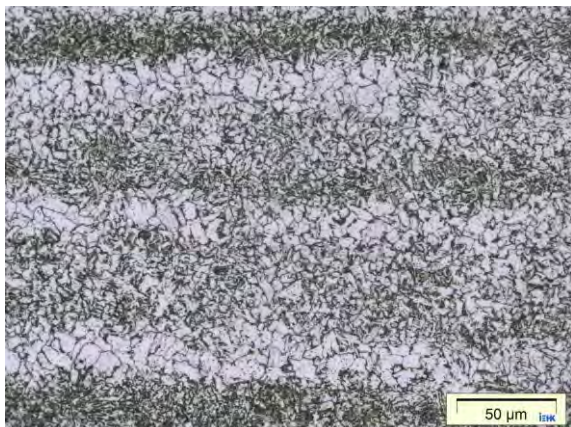


Naht 2: GKZ links

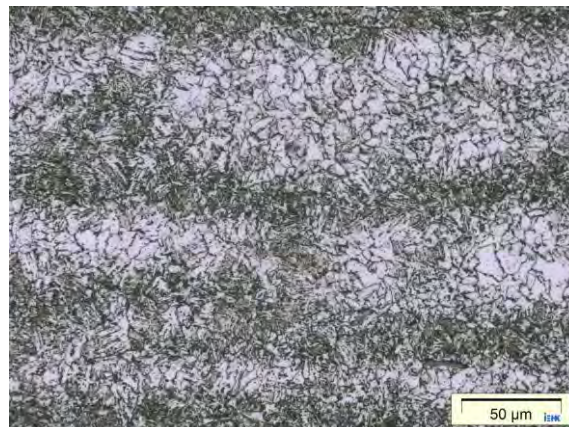


Naht 2: GKZ rechts

Bild B-12 Probe DHY-N6 – Gefüge der Grobkornzone bei 500-facher Vergrößerung



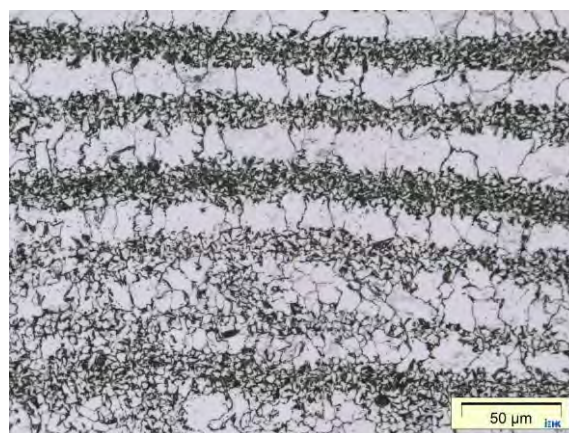
Naht 1: FKZ links



Naht 1: FKZ rechts



Naht 2: FKZ links



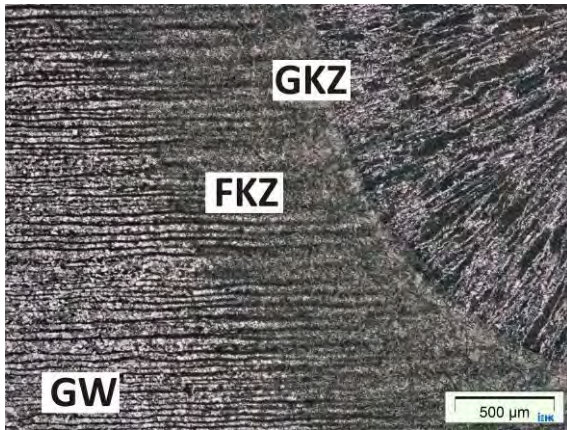
Naht 2: FKZ rechts

Bild B-13 **Probe DHY-N6 – Gefüge der Feinkornzone bei 500-facher Vergrößerung**

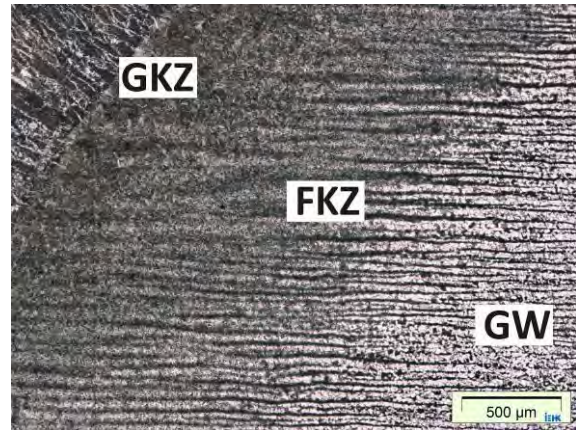
Probe DHY-N7:



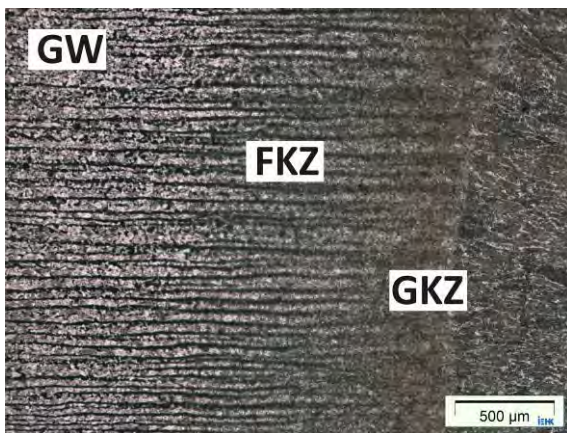
Bild B-14 **Probe DHY-N7 – Makroschliff an Stumpfstoßverbindung mit Öffnungswinkel 42°**



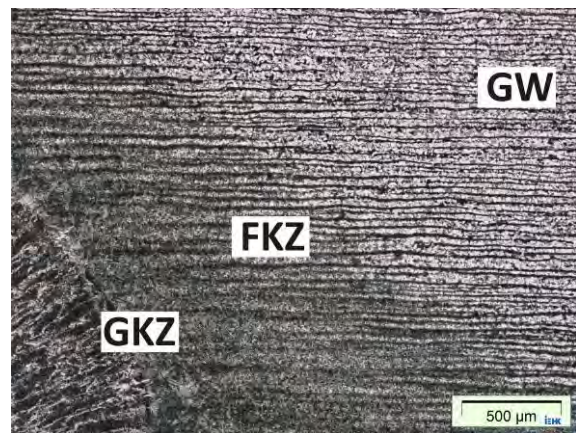
Naht 1: WEZ links



Naht 1: WEZ rechts

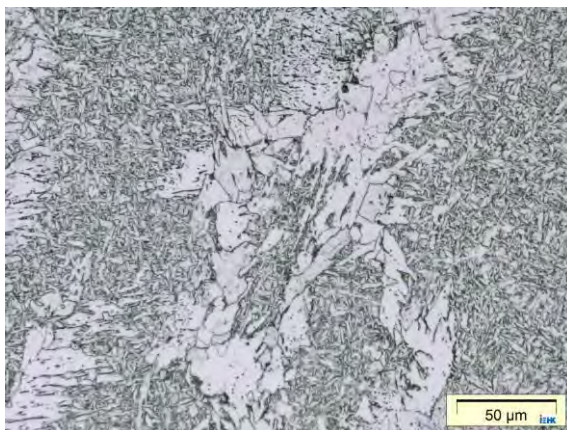


Naht 2: WEZ links

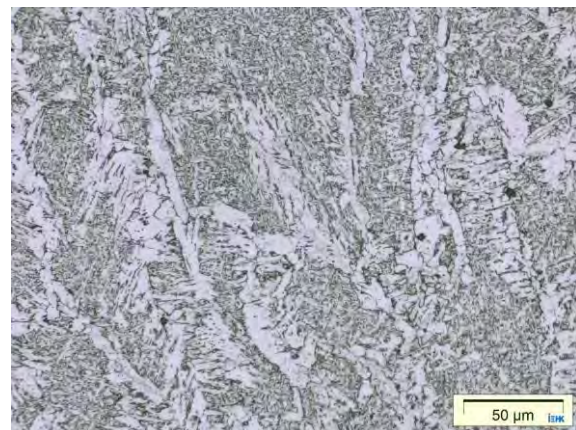


Naht 2: WEZ rechts

Bild B-15 Probe DHY-N7 – Übersicht der WEZ bei 50-facher Vergrößerung

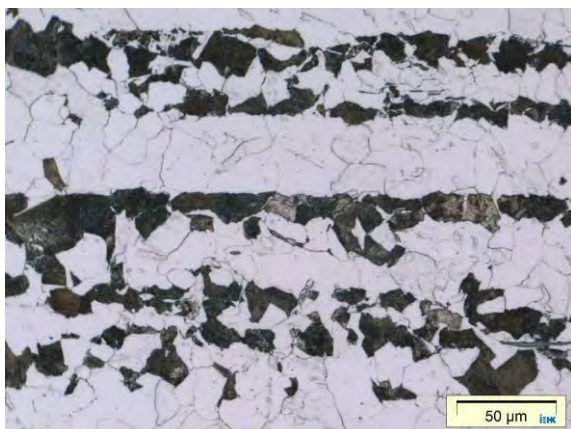


Naht 1: Schweißgut

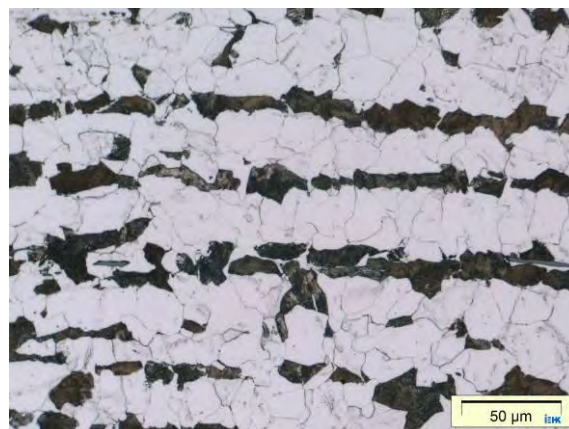


Naht 2: Schweißgut

Bild B-16 Probe DHY-N7 – Gefüge des Schweißguts bei 500-facher Vergrößerung

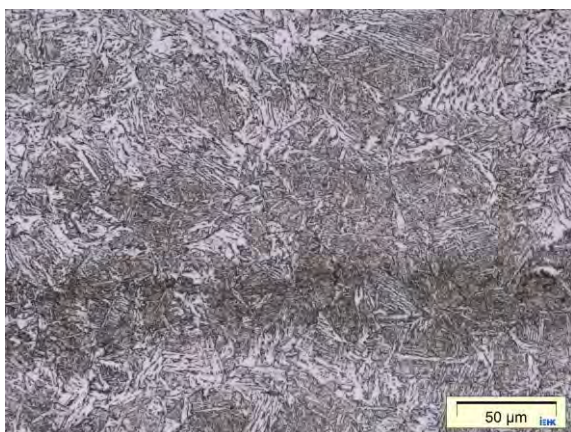


Naht 1: Grundwerkstoff links

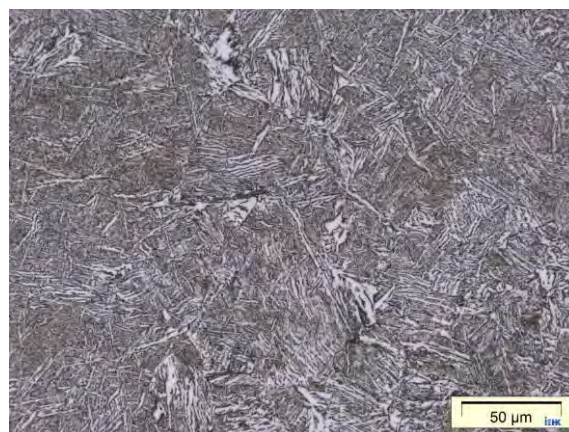


Naht 2: Grundwerkstoff rechts

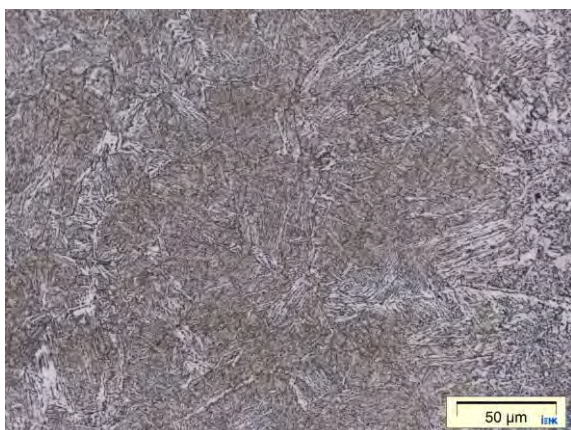
Bild B-17 Probe DHY-N7 – Gefüge des Grundwerkstoffs bei 500-facher Vergrößerung



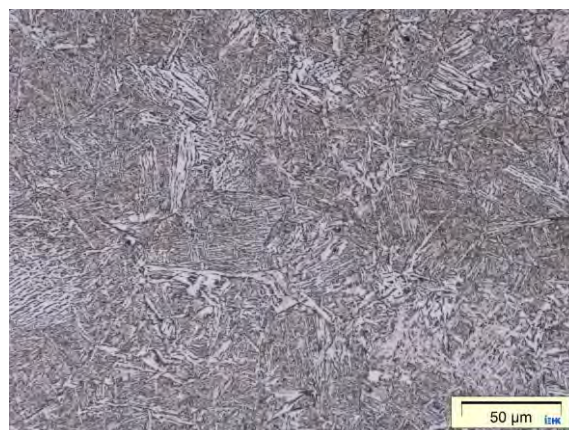
Naht 1: GKZ links



Naht 1: GKZ rechts

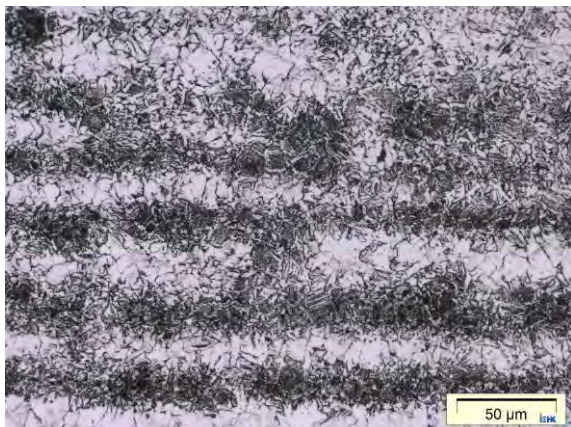


Naht 2: GKZ links

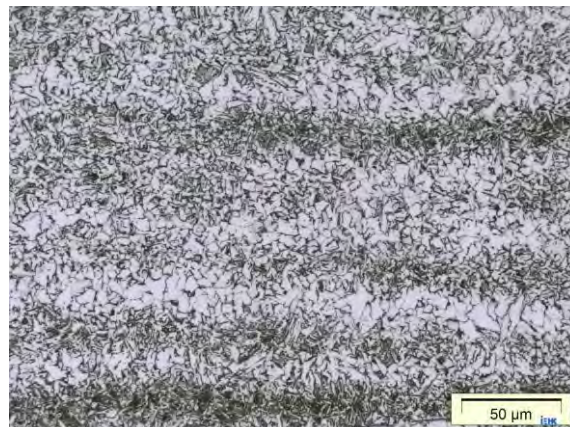


Naht 2: GKZ rechts

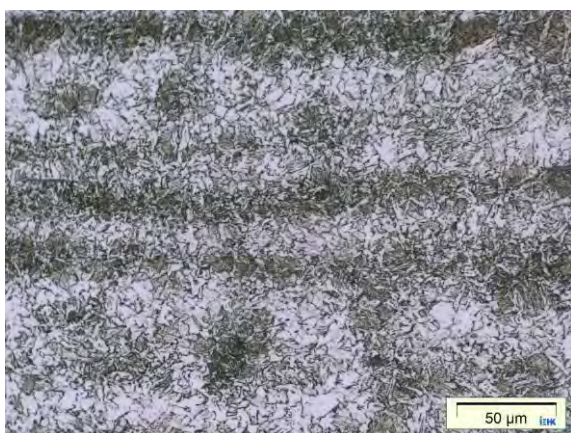
Bild B-18 Probe DHY-N7 – Gefüge der Grobkornzone bei 500-facher Vergrößerung



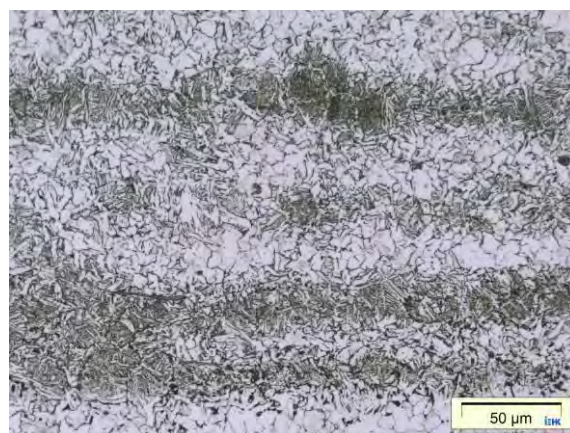
Naht 1: FKZ links



Naht 1: FKZ rechts



Naht 2: FKZ links



Naht 2: FKZ rechts

Bild B-19 **Probe DHY-N7 – Gefüge der Feinkornzone bei 500-facher Vergrößerung**

Anhang B.4 Ergebnisse der Bauteilversuche

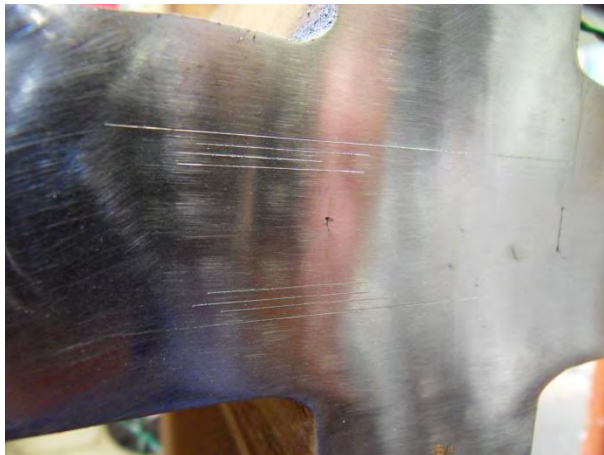
Kreuzstoßprobe DHY-N1:

Querschnitt

Querschnitt	t mm	B mm	A mm ²
DHY-N1	40,44	199,90	8084

Schwingversuch

Schwingversuch	σ_o MPa	σ_u MPa	$\Delta\sigma$ MPa	R -	σ_m MPa	σ_m/f_y -	F_o kN	F_u kN	ΔN LW	N LW	f Hz
Anriss	270	105	165	0,39	188	0,53	2185	850	30.000	30.000	28
Rastlinie 1	220	100	120	0,45	160	0,45	1780	810	12.000	42.000	28
Risswachstum 1	240	100	140	0,42	170	0,48	1940	810	30.000	72.000	28
Rastlinie 2	200	100	100	0,50	150	0,42	1615	810	20.000	92.000	28
Risswachstum 2	220	100	120	0,45	160	0,45	1780	810	33.000	95.000	28
Rastlinie 3	200	100	100	0,50	150	0,42	1615	810	30.000	125.000	28
Risswachstum 3	220	100	120	0,45	160	0,45	1780	810	65.000	190.000	28
Rastlinie 4	200	100	100	0,50	150	0,42	1615	810	17.000	207.000	28
Risswachstum 4	220	100	120	0,45	160	0,45	1780	810	18.000	225.000	28



Ansicht von Position 0



Ansicht von Position 200

Bild B-20 Ansicht der Stirnseiten der eingeschwungenen Restspalte von Probe DHY-N1

Quasi-statischer Zugversuch bei $T_{exp} = -106 \text{ °C}$

Querschnitt	Versagen	Bruchlast kN	Bruchweg mm
DHY-N1	zäh (links)	3443	43,4

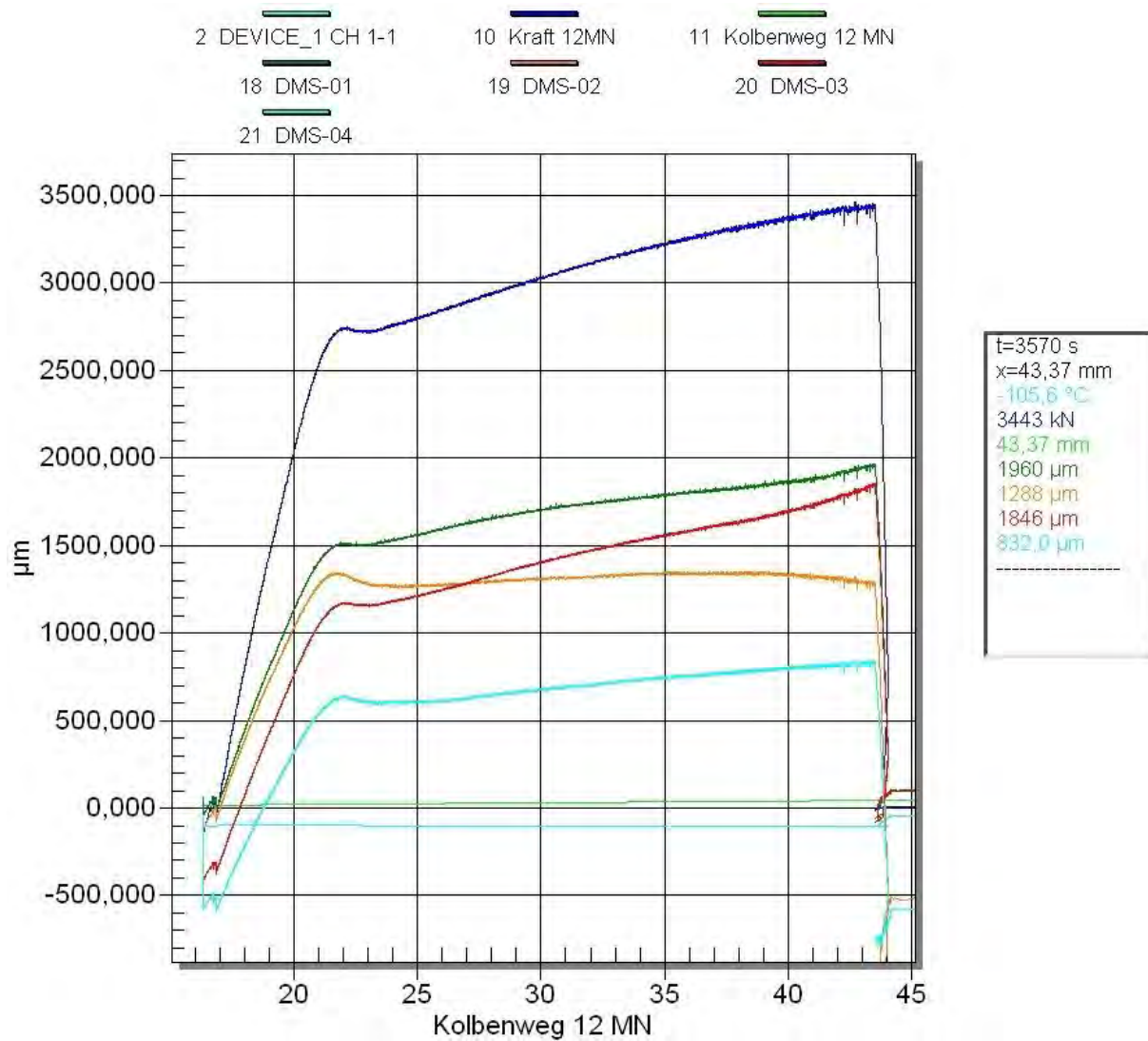


Bild B-21 Ergebnis des Zugversuchs der Kreuzprobe DHY-N1

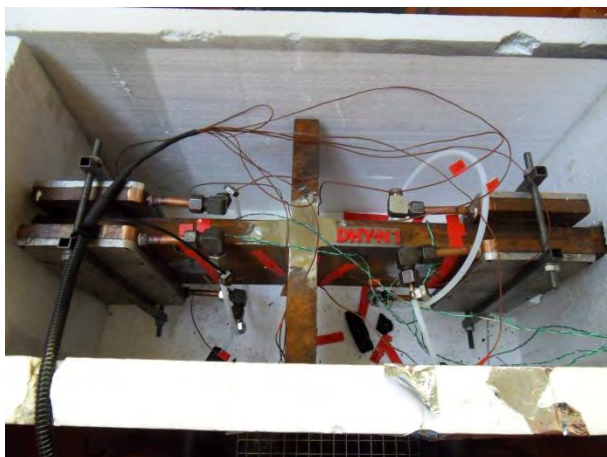


Bild B-22 Kreuzprobe DHY-N1 im Versuchsstand, vor und nach dem Zugversuch

Bewertung des Ermüdungsbruches



Bild B-23 Bruchflächen der Kreuzprobe DHY-N1

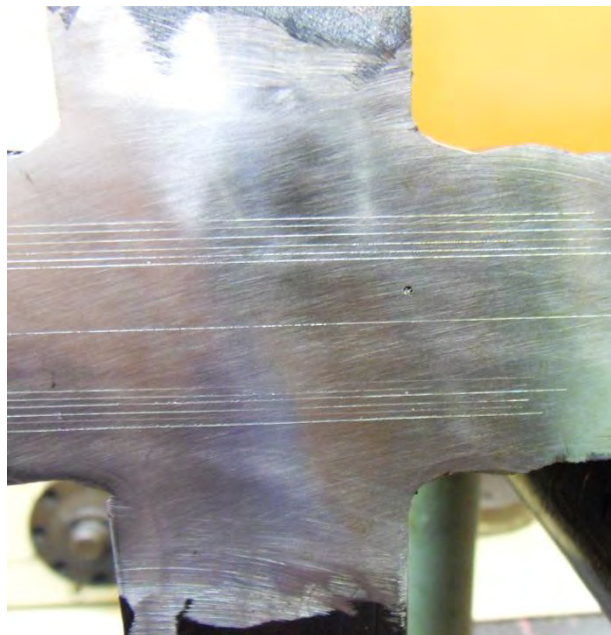
Kreuzstoßprobe DHY-N1-2:Querschnitt

Querschnitt	t mm	B mm	A mm ²
DHY-N1	40,2	203,5	8181

Schwingversuch

Schwing- versuch	σ_o MPa	σ_u MPa	$\Delta\sigma$ MPa	R -	σ_m MPa	σ_m/f_y -	F_o kN	F_u kN	ΔN LW	N LW	f Hz
Anriss	265	110	155	0,42	188	0,53	2160	890	115.000	115.000	31
Rastlinie 1	200	110	90	0,55	155	0,44	1620	890	55.000	170.000	32
Risswachstum 1	240	110	130	0,46	175	0,49	1940	890	38.500	208.500	32
Rastlinie 2	200	110	90	0,55	155	0,44	1620	890	56.500	265.000	32
Risswachstum 2	240	110	130	0,46	175	0,49	1940	890	19.500	284.500	32

nicht vorhanden



Ansicht von Position 0

Ansicht von Position 200

Bild B-24 Ansicht der Stirnseiten der eingeschwungenen Restspalte von Probe DHY-N1-2

Quasi-statischer Zugversuch bei $T_{exp} = -135 \text{ °C}$

Querschnitt	Versagen	Bruchlast kN	Bruchweg mm
DHY-N1-2	spröde (links) Versagen im Schweißgut	2477	2,77

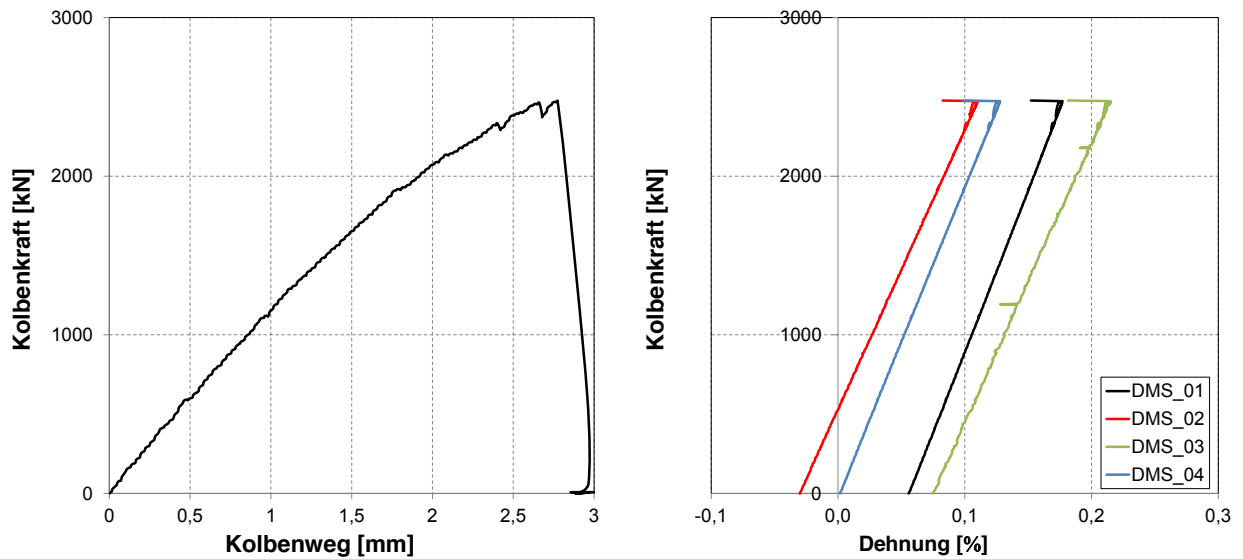


Bild B-25 Ergebnis des Zugversuchs der Kreuzprobe DHY-N1-2

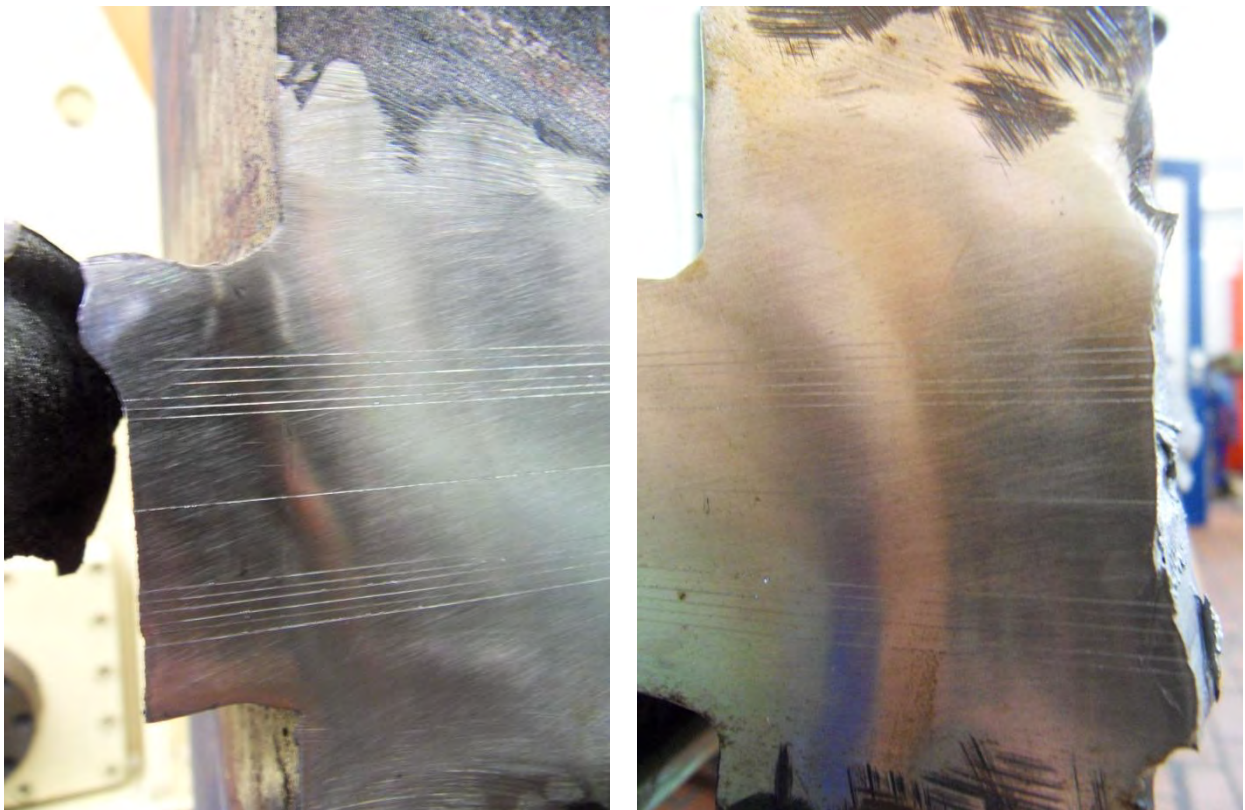


Bild B-26 Kreuzprobe DHY-N1-2 nach dem Zugversuch

Bewertung des Ermüdungsbruches

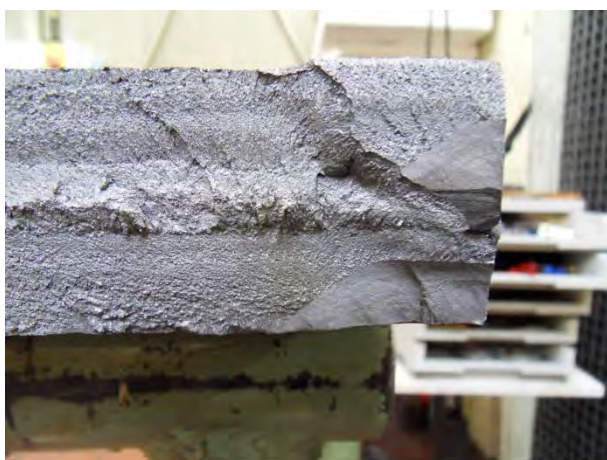


Bild B-27 Bruchflächen der Kreuzprobe DHY-N1-2



Bild B-28 Aufgefräste Bruchflächen der Kreuzprobe DHY-N1-2

Kreuzstoßprobe DHY-N2:Querschnitt

Querschnitt	t mm	B mm	A mm ²
DHY-N2	40,46	200,60	8116

Schwingversuch

Schwing- versuch	σ_o MPa	σ_u MPa	$\Delta\sigma$ MPa	R -	σ_m MPa	σ_m/f_y -	F_o kN	F_u kN	ΔN LW	N LW	f Hz
Anriss	270	110	160	0,41	140	0,39	2180	890	37.000	37.000	28
Rastlinie 1	220	100	120	0,45	115	0,32	1780	810	15.000	52.000	28
Risswachstum 1	240	100	140	0,42	125	0,35	1940	810	25.000	77.000	28
Rastlinie 2	200	100	100	0,50	150	0,42	1620	810	15.000	92.000	28
Risswachstum 2	220	100	120	0,45	115	0,32	1780	810	51.000	143.000	28

Quasi-statischer Zugversuch bei $T_{\text{exp}} = -86 \text{ }^\circ\text{C}$

Querschnitt	Versagen	Bruchlast kN	Bruchweg mm
DHY-N2	- zäh (links)	3647	38,3

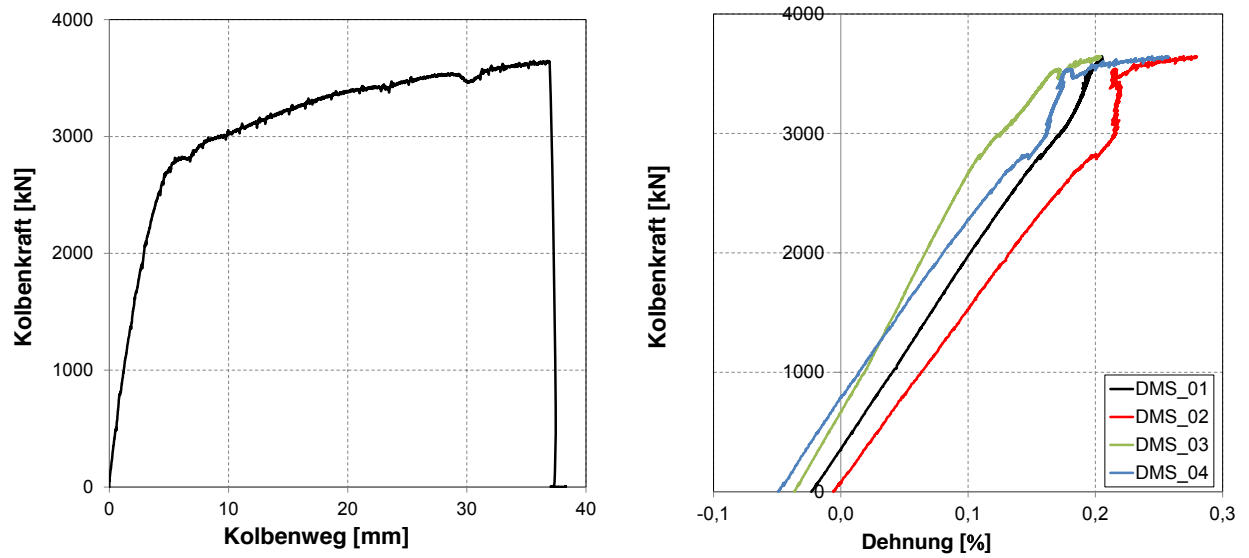


Bild B-29 Ergebnis des Zugversuchs der Kreuzprobe DHY-N2

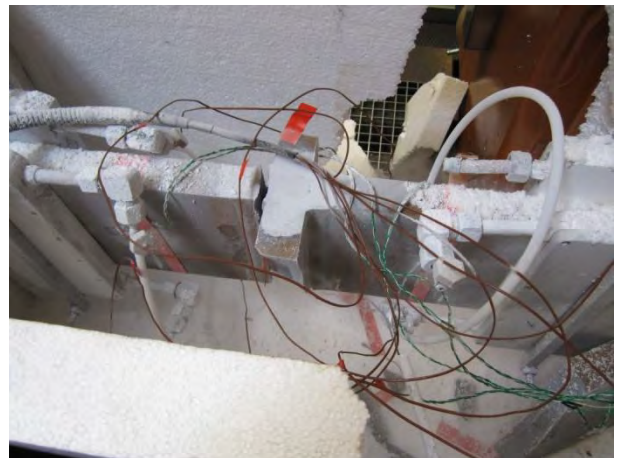
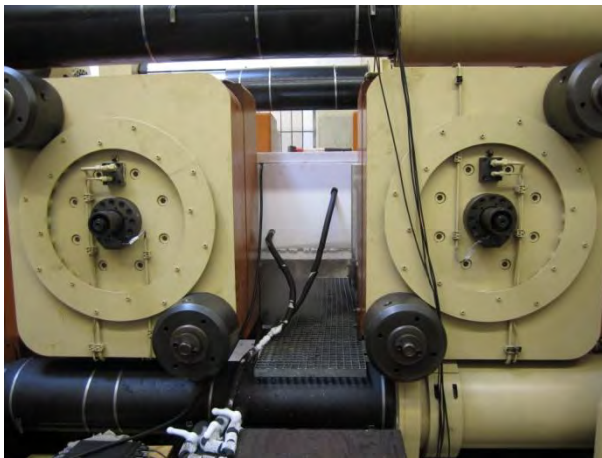


Bild B-30 Kreuzprobe DHY-N2 im Versuchsstand, vor und nach dem Zugversuch

Bewertung des Ermüdungsbruches

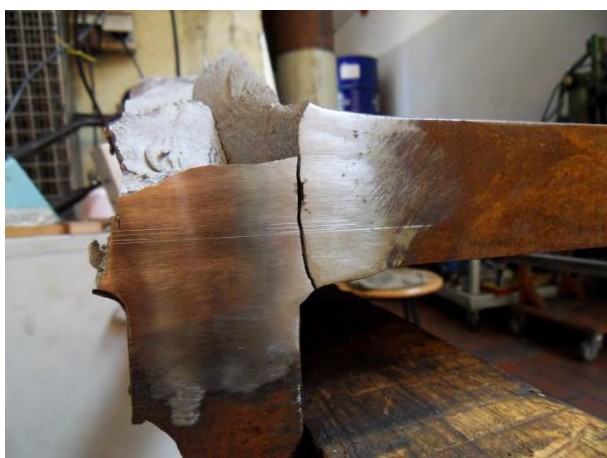


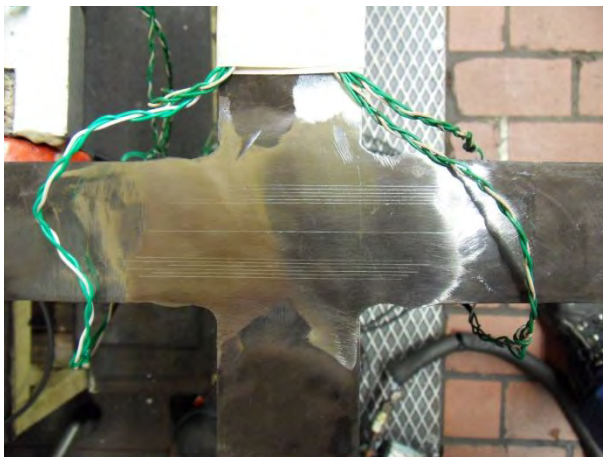
Bild B-31 Bruchflächen / Bruchbild der Kreuzprobe DHY-N2

Kreuzstoßprobe DHY-N2-2:Querschnitt

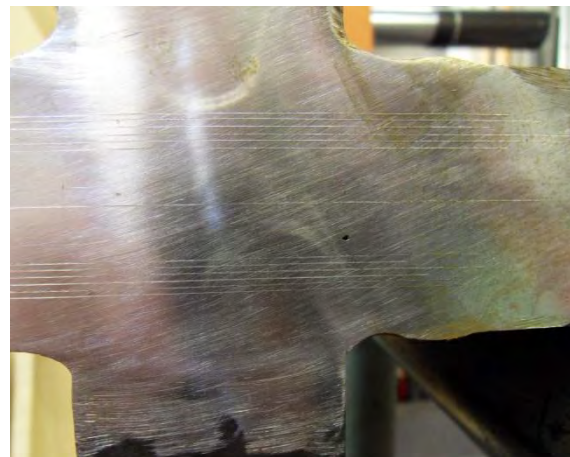
Querschnitt	t mm	B mm	A mm ²
DHY-N1	40,2	202	8120

Schwingversuch

Schwing- versuch	σ_o MPa	σ_u MPa	$\Delta\sigma$ MPa	R -	σ_m MPa	σ_m/f_y -	F_o kN	F_u kN	ΔN LW	N LW	f Hz
Anriss	270	110	160	0,41	190	0,54	2185	895	140.000	140.000	31
Rastlinie 1	200	110	90	0,55	155	0,44	1615	895	86.000	226.000	32
Risswachstum 1	240	110	130	0,46	175	0,49	1930	895	18.500	244.500	31
Rastlinie 2	200	110	90	0,55	155	0,44	1615	895	25.500	270.000	32
Risswachstum 2	240	110	130	0,46	175	0,49	1930	895	28.000	298.000	33
Rastlinie 3	200	110	90	0,55	155	0,44	1615	895	18.000	316.000	33



Ansicht von Position 0



Ansicht von Position 200

Bild B-32 Ansicht der Stirnseiten der eingeschwungenen Restspalte von Probe DHY-N2-2

Quasi-statischer Zugversuch bei $T_{exp} = -130 \text{ °C}$

Querschnitt	Versagen	Bruchlast kN	Bruchweg mm
DHY-N2-2	Spröde (links) Versagen im Schweißgut	1796	1,61

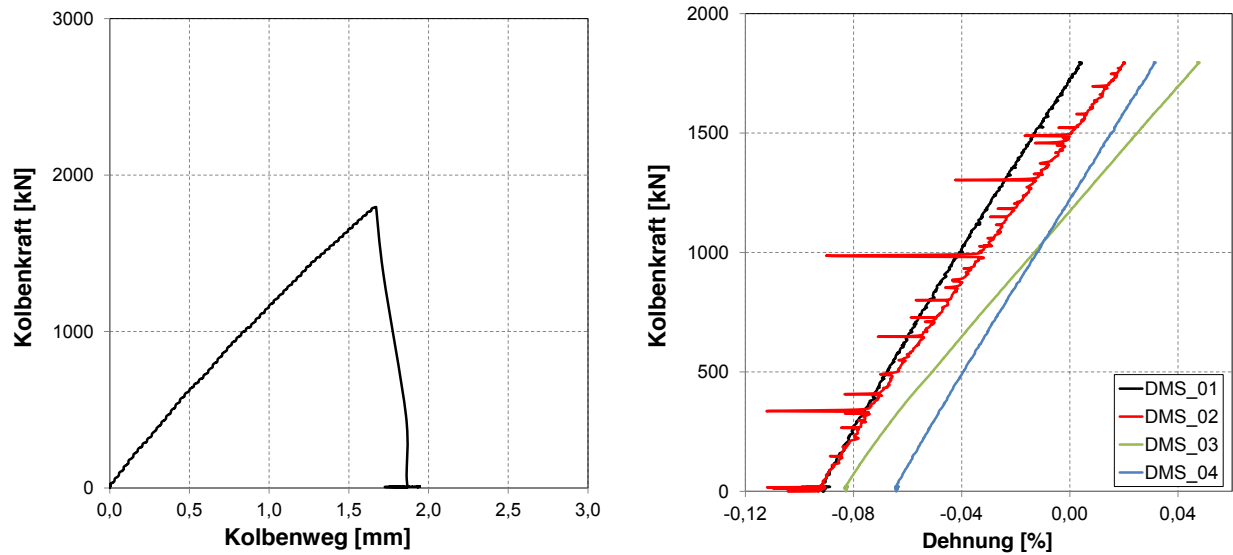


Bild B-33 Ergebnis des Zugversuchs der Kreuzprobe DHY-N2-2

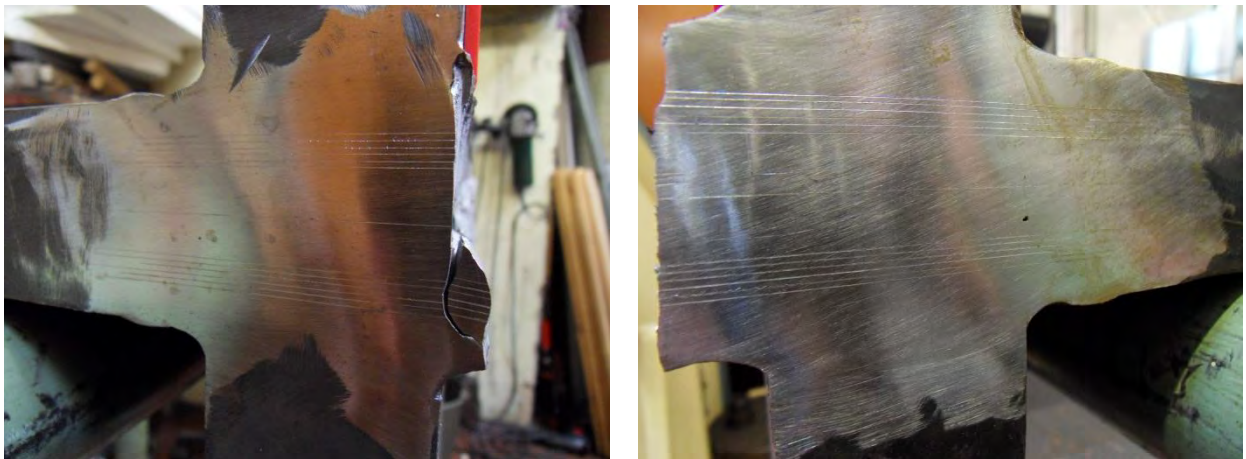


Bild B-34 Kreuzprobe DHY-N2-2 nach dem Zugversuch

Bewertung des Ermüdungsbruches



Bild B-35 Bruchflächen der Kreuzprobe DHY-N2-2

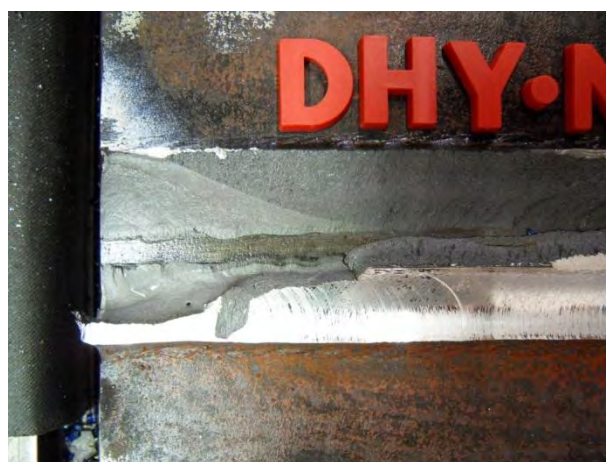


Bild B-36 Aufgefräste Bruchflächen der Kreuzprobe DHY-N2-2

Stumpfstoßprobe DHY-N4:**Querschnitt**

Querschnitt	t mm	B mm	A mm ²
DHY-N4	40,51	201,50	8162

Schwingversuch

Schwing- versuch	σ_o MPa	σ_u MPa	$\Delta\sigma$ MPa	R -	σ_m MPa	σ_m/f_y -	F_o kN	F_u kN	ΔN LW	N LW	f Hz
Anriss	240	100	140	0,42	120	0,34	1950	810	50.000	50.000	28
Rastlinie 1	200	100	100	0,50	150	0,42	1630	810	15.000	65.000	28
Risswachstum 1	220	100	120	0,45	160	0,45	1795	810	50.000	115.000	28
Rastlinie 2	200	100	100	0,50	150	0,42	1630	810	15.000	130.000	28
Risswachstum 2	220	100	120	0,45	160	0,45	1795	810	135.000	265.000	28
Rastlinie 3	200	100	100	0,50	150	0,42	1630	810	15.000	280.000	28
Risswachstum 3	220	100	120	0,45	160	0,45	1795	810	100.000	380.000	28
Rastlinie 4	200	100	100	0,50	150	0,42	1800	810	15.000	395.000	28
Risswachstum 4	220	100	120	0,45	160	0,45	1795	810	100.000	495.000	28
Rastlinie 5	200	100	100	0,50	150	0,42	1630	810	15.000	510.000	28
Risswachstum 5	220	100	120	0,45	160	0,45	1795	810	100.000	610.000	28



Ansicht von Position 0



Ansicht von Position 200

Bild B-37 Ansicht der Stirnseiten der eingeschwungenen Restspalte von Probe DHY-N4

Quasi-statischer Zugversuch bei $T_{\text{exp}} = -111 \text{ °C}$

Querschnitt	Versagen	Bruchlast kN	Bruchweg mm
DHY-N4	- zäh	3897	54,4

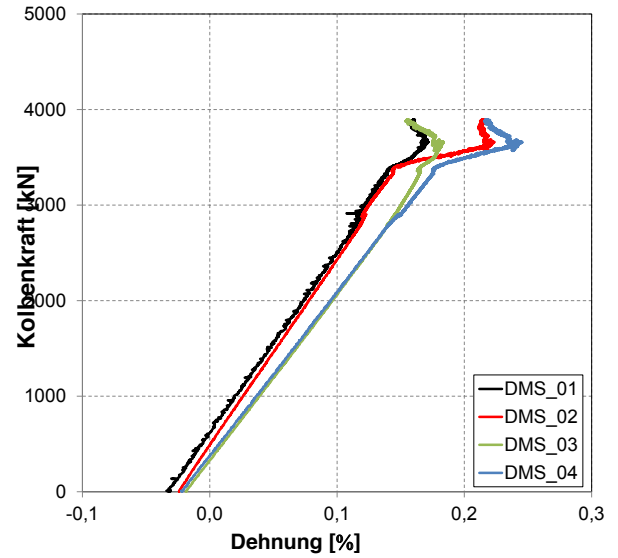
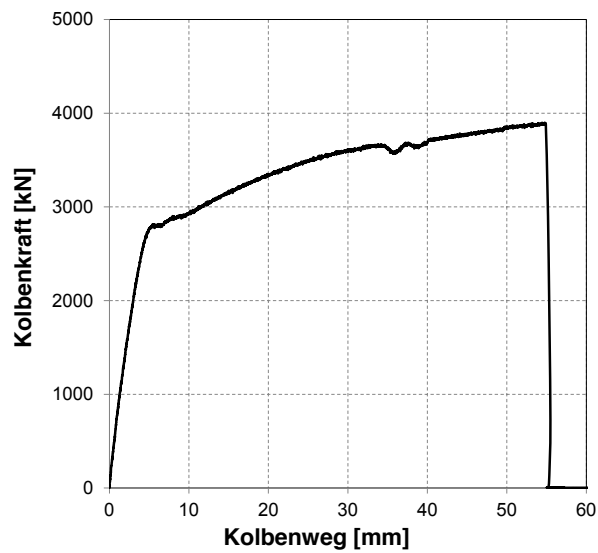


Bild B-38 Ergebnis des Zugversuchs der Stumpfstoßprobe DHY-N4



Bild B-39 Stumpfstoß DHY-N4 im Versuchsstand, vor und nach dem Zugversuch

Bewertung des Ermüdungsbruches



Bild B-40 **Bruchflächen / Bruchbild der Stumpfstoßprobe DHY-N4**

Kreuzstoßprobe DHY-N4-2:Querschnitt

Querschnitt	t mm	B mm	A mm ²
DHY-N4-2	40,0	203,6	8144

Schwingversuch

Schwing- versuch	σ_o MPa	σ_u MPa	$\Delta\sigma$ MPa	R -	σ_m MPa	σ_m/f_y -	F_o kN	F_u kN	ΔN LW	N LW	f Hz
Anriss	270	110	160	0,41	240	0,68	2180	895	59.000	59.000	31
Rastlinie 1	200	110	90	0,55	155	0,44	1620	895	31.000	90.000	31
Risswachstum 1	240	110	130	0,46	175	0,49	1940	895	50.000	140.000	31
Rastlinie 2	200	110	90	0,55	155	0,44	1620	895	16.000	156.000	31
Risswachstum 2	240	110	130	0,46	175	0,49	1940	895	16.000	172.000	31
Rastlinie 3	200	110	90	0,55	155	0,44	1620	895	28.000	200.000	31
Risswachstum 3	240	110	130	0,46	175	0,49	1940	895	5.000	205.000	33
Rastlinie 4	200	110	90	0,55	155	0,44	1620	895	22.000	227.000	33

Quasi-statischer Zugversuch bei $T_{\text{exp}} = -155 \text{ °C}$

Querschnitt	Versagen	Bruchlast kN	Bruchweg mm
DHY-N4-2	- spröde	1346	1,21

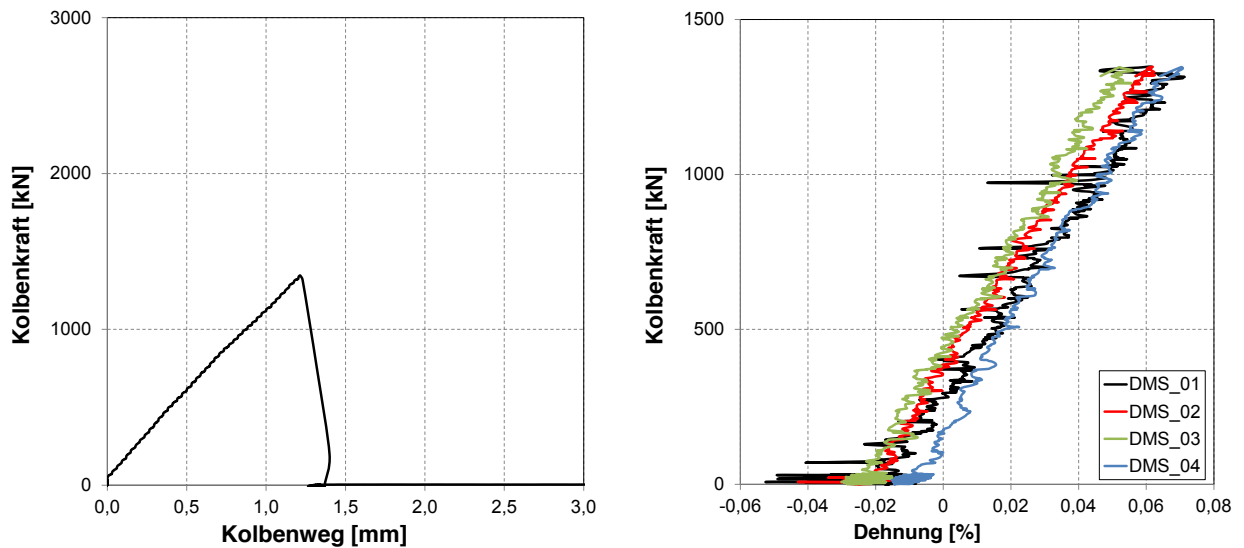


Bild B-41 Ergebnis des Zugversuchs der Stumpfstoßprobe DHY-N4-2

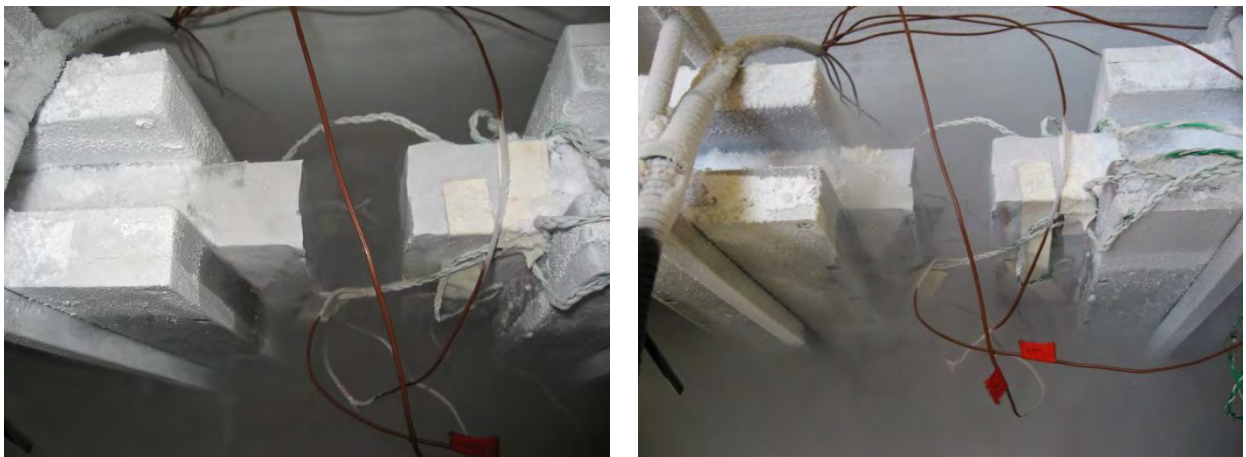


Bild B-42 Stumpfstoß DHY-N4-2 im Versuchsstand nach dem Zugversuch

Bewertung des Ermüdungsbruches



Bild B-43 Bruchflächen / Bruchbild der Stumpfstoßprobe DHY-N4-2

Stumpfstoßprobe DHY-N5:**Querschnitt**

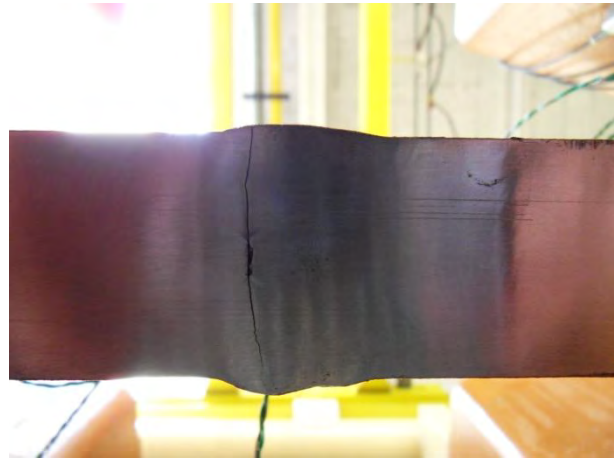
Querschnitt	t mm	B mm	A mm ²
DHY-N5	40,35	201,30	8122

Schwingversuch

Schwingversuch	σ_o MPa	σ_u MPa	$\Delta\sigma$ MPa	R -	σ_m MPa	σ_m/f_y -	F_o kN	F_u kN	ΔN LW	N LW	f Hz
Anriss	240	100	140	0,42	170	0,48	1950	810	80.000	80.000	28
Rastlinie 1	200	100	100	0,50	150	0,42	1625	810	15.000	95.000	28
Risswachstum 1	220	100	120	0,45	160	0,45	1780	810	30.000	125.000	28
Rastlinie 2	200	100	100	0,50	150	0,42	1625	810	15.000	140.000	28
Risswachstum 2	220	100	120	0,45	160	0,45	1780	810	35.000	175.000	28
Risswachstum 3	265	110	155	0,42	188	0,53	2150	890	24.000	199.000	28
Rastlinie 3	220	100	120	0,45	160	0,45	1780	810	15.000	214.000	28
Risswachstum 4	235	100	135	0,43	168	0,47	1910	810	16.000	230.000	28



Ansicht von Position 0



Ansicht von Position 200

Bild B-44 Ansicht der Stirnseiten der eingeschwungenen Restspalte von Probe DHY-N5

Quasi-statischer Zugversuch bei $T_{\text{exp}} = -106 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Querschnitt	Versagen	Bruchlast kN	Bruchweg mm
DHY-N5	spröde	2808	14,4

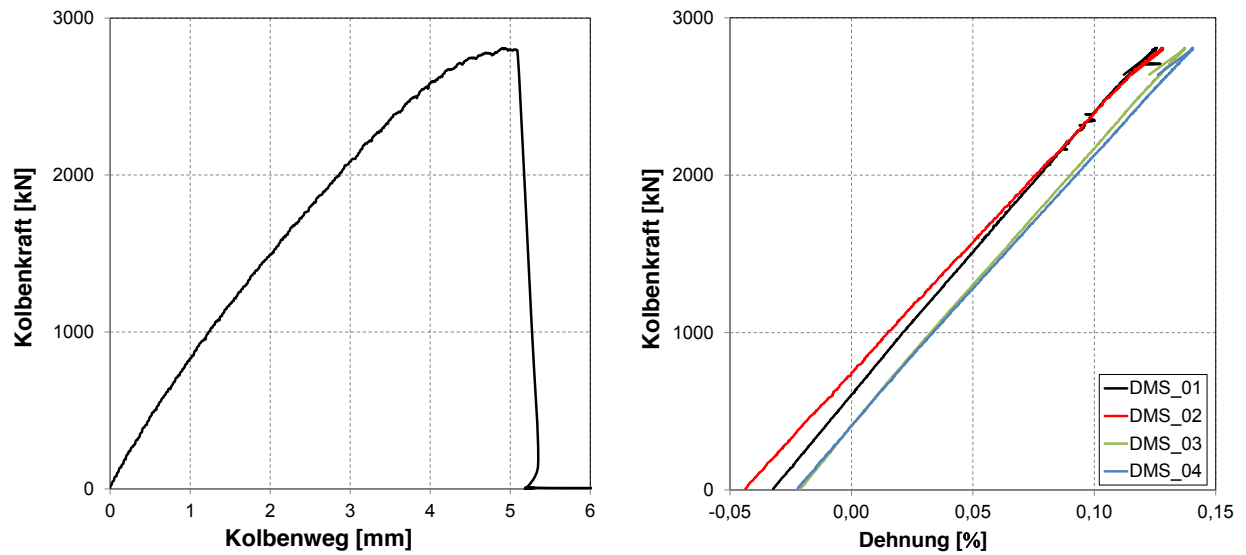


Bild B-45 Ergebnis des Zugversuchs der Stumpfstoßprobe DHY-N5

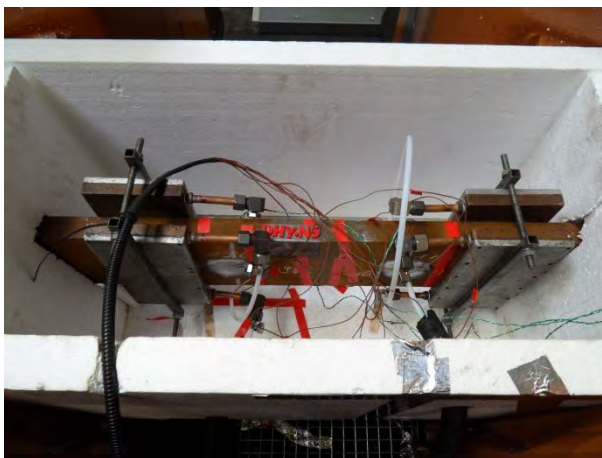


Bild B-46 Stumpfstoß DHY-N5 im Versuchsstand, vor und nach dem Zugversuch

Bewertung des Ermüdungsbruches



Bild B-47 Bruchflächen / Bruchbild der Stumpfstoßprobe DHY-N5

Stumpfstoßprobe DHY-N6-2:Querschnitt

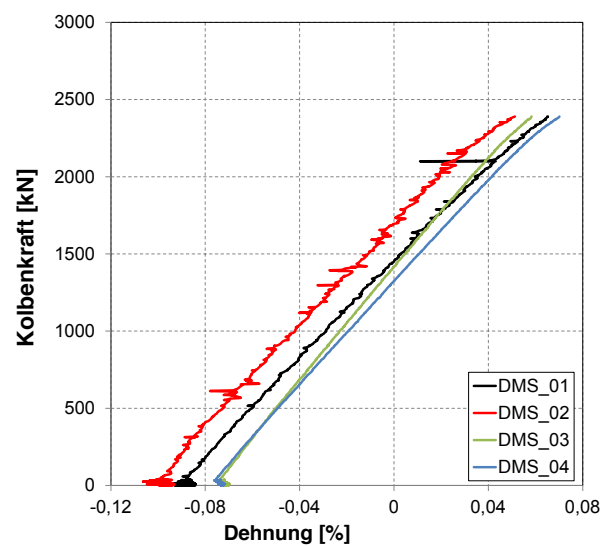
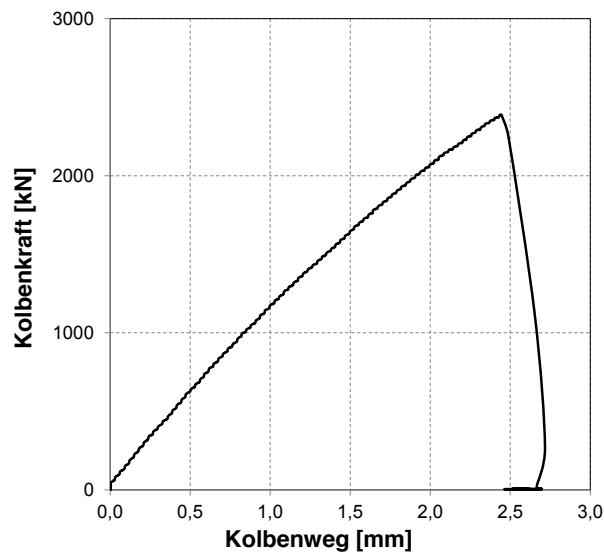
Querschnitt	t mm	B mm	A mm ²
DHY-N6-2	40,0	203,0	8120

Schwingversuch

Schwingversuch	σ_o MPa	σ_u MPa	$\Delta\sigma$ MPa	R -	σ_m MPa	σ_m/f_y -	F_o kN	F_u kN	ΔN LW	N LW	f Hz
Anriss	270	110	160	0,41	190	0,54	2175	895	60.000	60.000	31
Rastlinie 1	200	110	90	0,55	155	0,44	1620	895	50.000	110.000	32
Risswachstum 1	240	110	130	0,46	175	0,49	1935	895	58.000	168.000	32
Rastlinie 2	200	110	90	0,55	155	0,44	1620	895	54.500	222.500	32
Risswachstum 2	240	110	130	0,46	175	0,49	1935	895	89.000	311.500	31
Rastlinie 3	200	110	90	0,55	155	0,44	1620	895	18.500	330.000	33

Quasi-statischer Zugversuch bei $T_{exp} = -135^\circ\text{C}$

Querschnitt	Versagen -	Bruchlast kN	Bruchweg mm
DHY-N6-2	spröde	2390	2,44

**Bild B-48** Ergebnis des Zugversuchs des Stumpfstoßes DHY-N6-2

Bewertung des Ermüdungsbruches

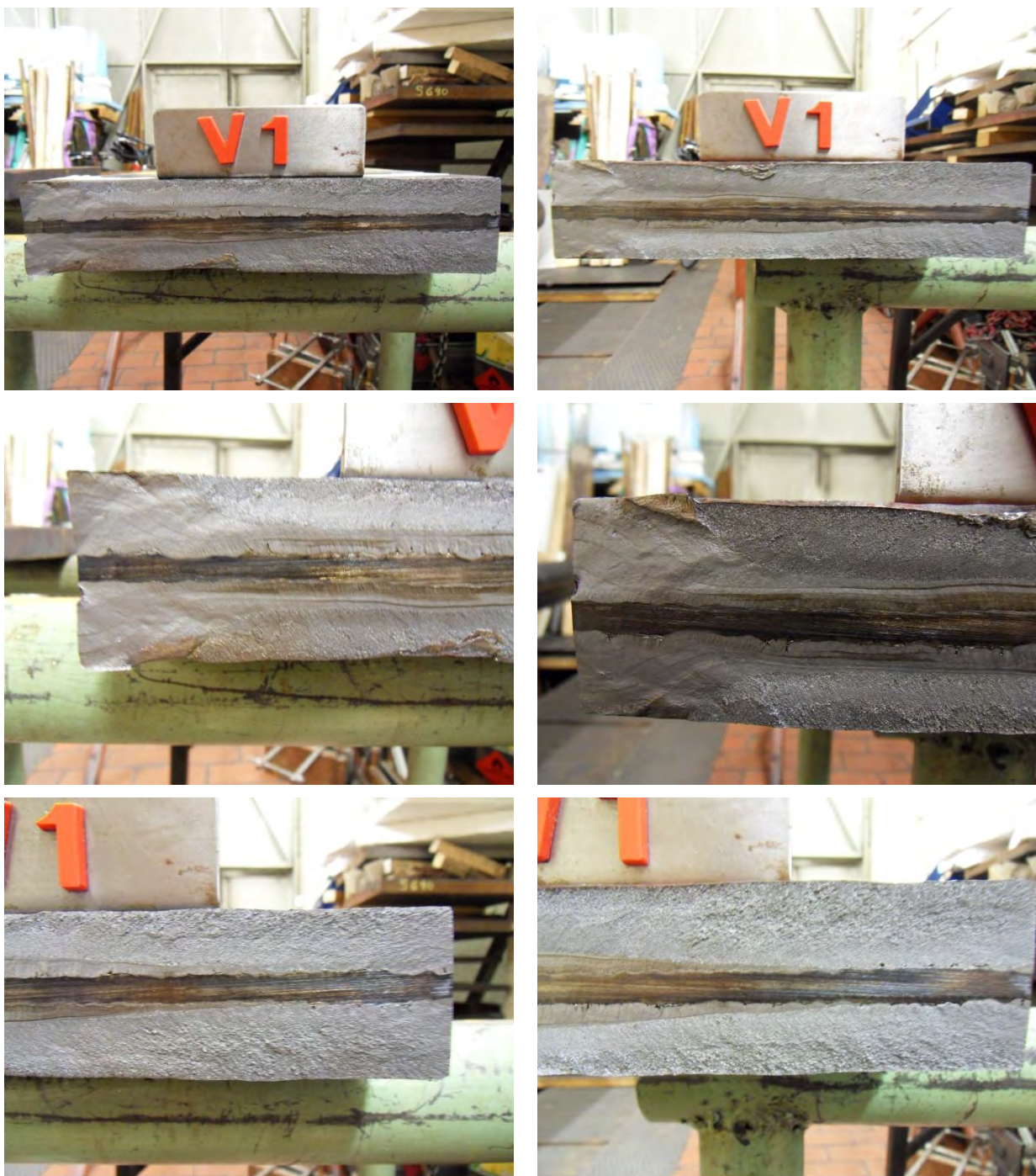


Bild B-49 Bruchflächen / Bruchbild des Stumpfstoßes DHY-N6-2

Anhang C Rissfortschrittssimulationen

Anhang C.1 K-Faktoren entlang der Rissfront

DHY-Naht, $t = 20$ mm:

Im Folgenden sind beispielhaft die K-Werte für das Referenzmodell gemäß Bild 4-7 für einen Restspalt der Größe $2a = 14$ mm entlang der Rissfront sowohl nach der CTOD als auch nach der J-Integral-Methode dargestellt.

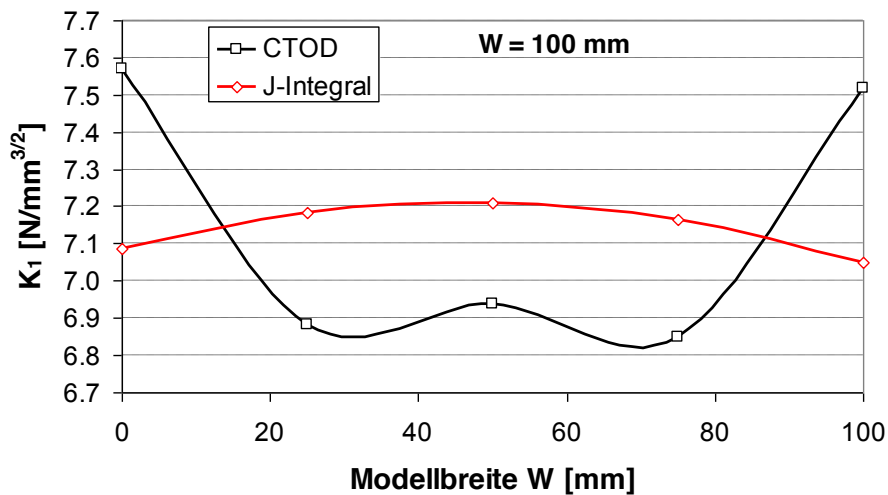


Bild C-1 Verlauf der SIF bei der DHY-Naht entlang der Rissfront für $2a = 14$ mm und $w = 100$ mm

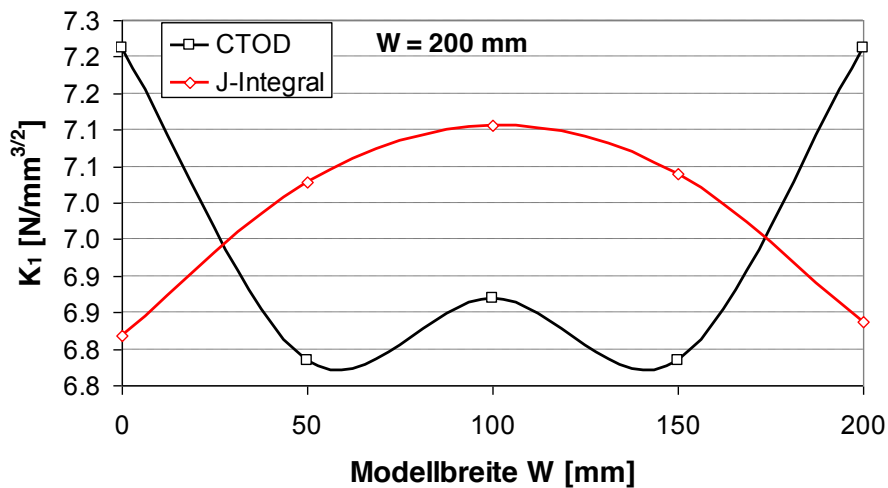


Bild C-2 Verlauf der SIF bei der DHY-Naht entlang der Rissfront für $2a = 14$ mm und $w = 200$ mm

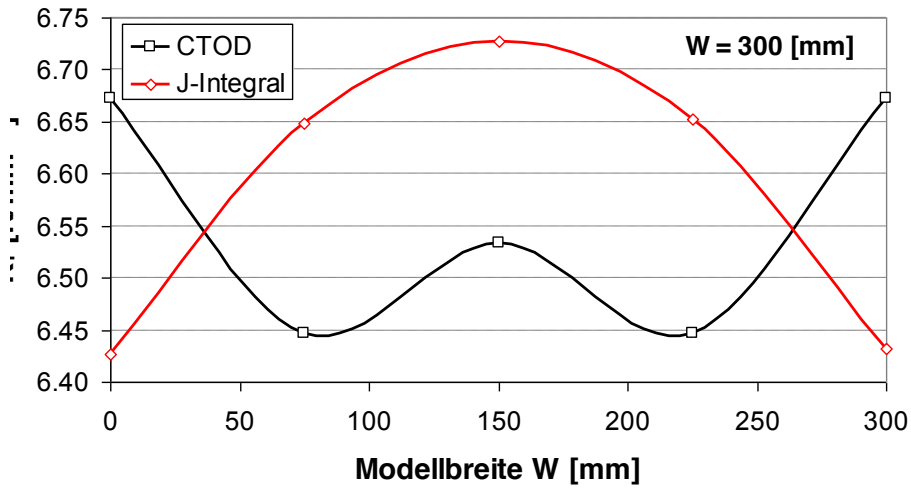


Bild C-3 Verlauf der SIF bei der DHY-Naht entlang der Rissfront für $2a = 14$ mm und $w = 200$ mm

HY-Naht, $t = 10$ mm:

Die folgenden K-Werte wurden beispielhaft für einen Riss der Größe $a = 7$ mm berechnet.

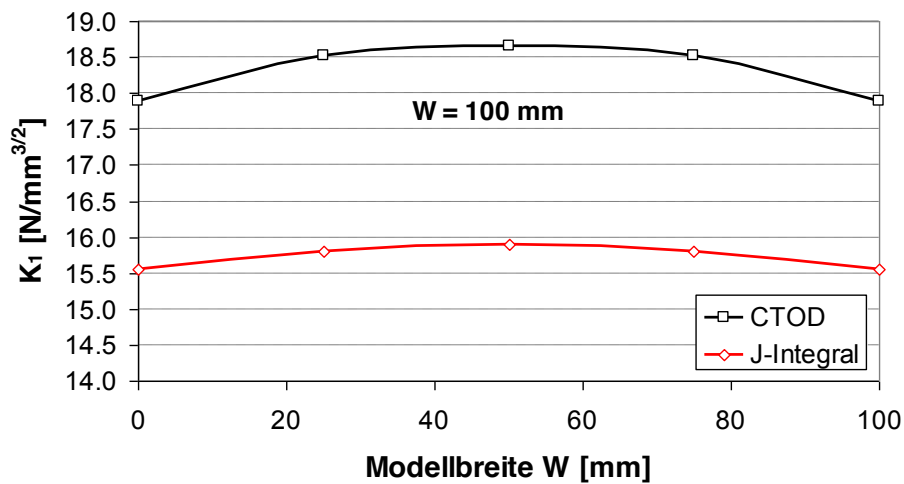


Bild C-4 Verlauf der SIF bei der HY-Naht entlang der Rissfront für $a = 7$ mm und $w = 200$ mm

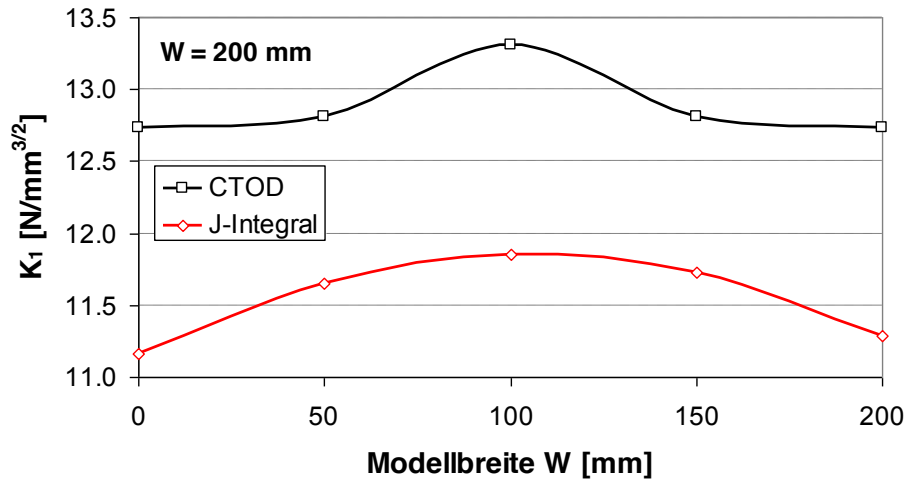


Bild C-5 Verlauf der SIF bei der HY-Naht entlang der Rissfront für $a = 7$ mm und $w = 200$ mm

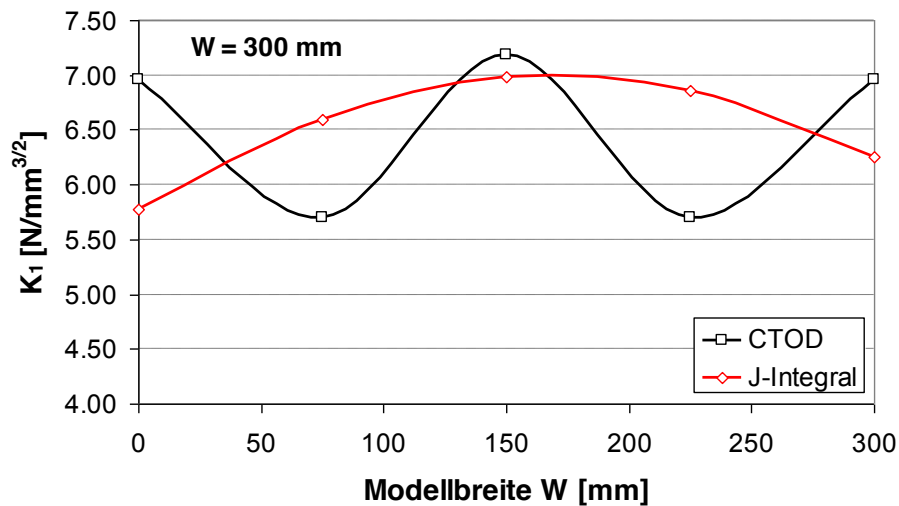


Bild C-6 Verlauf der SIF bei der HY-Naht entlang der Rissfront für $a = 7$ mm und $w = 200$ mm

Anhang C.2 Maßgeblicher K-Faktor

Gemäß Anhang C.1 zeigt sich für die mit der J-Integral-Methode ermittelten Spannungintensitätsfaktoren für die DHY- als auch die HY-Naht ein Maximum in Bauteilmitte, d.h., im Ellipsenscheitel.

Dies gilt ebenso für die nach der CTOD-Methode ermittelten Spannungintensitätsfaktoren für die HY-Naht.

Dahingegen wird ein Maximum für die nach der CTOD-Methode ermittelten Spannungintensitätsfaktoren bei der DHY-Naht an den Bauteilrändern erzielt.

Im Folgenden wird beispielhaft der Vergleich der nach J-Integral- und CTOD-Methode berechneten maßgeblichen Spannungintensitätsfaktoren gezeigt.

DHY-Naht, $t = 20$ mm:

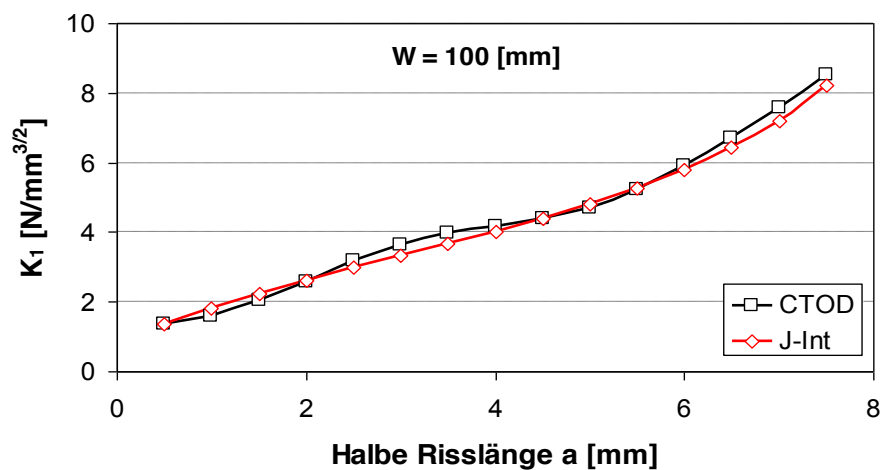


Bild C-7 Vergleich der SIF bei der DHY-Naht für $w = 100$ mm

HY-Naht, $t = 10$ mm:

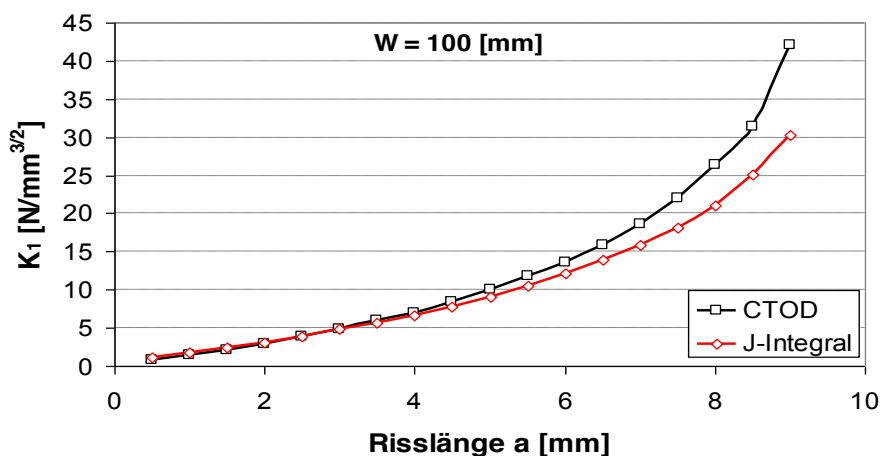
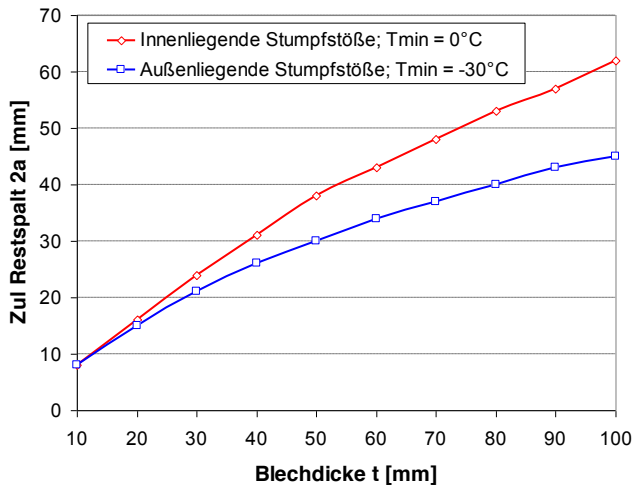


Bild C-8 Vergleich der SIF bei der HY-Naht für $w = 100$ mm

Anhang D Zulässige Restspalte für Stumpfstoßverbindungen

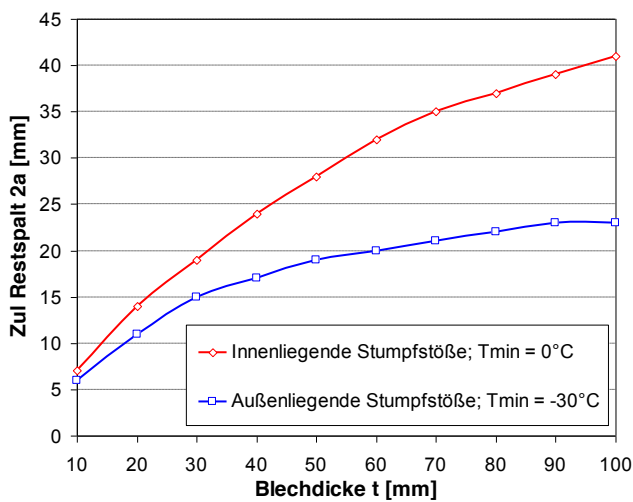
Anhang D.1 Stumpfstöße mit DHY-Schweißnaht unter vorwiegend ruhender Beanspruchung



Lastniveau $\sigma_p = 0,25 \cdot f_y(t)$

B = 200 mm

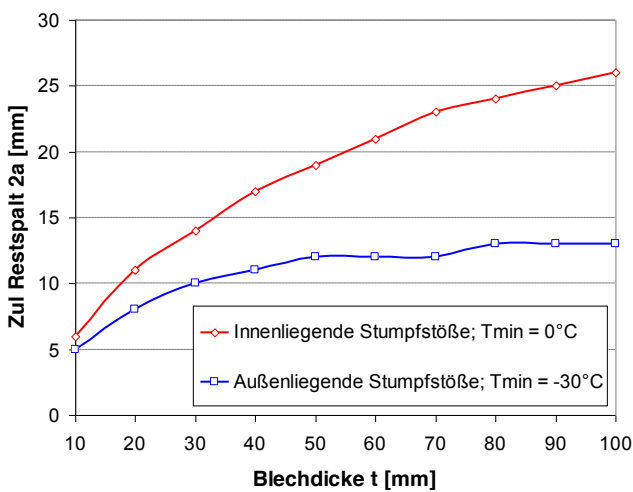
Gütegruppe S355J2



Lastniveau $\sigma_p = 0,50 \cdot f_y(t)$

B = 200 mm

Gütegruppe S355J2

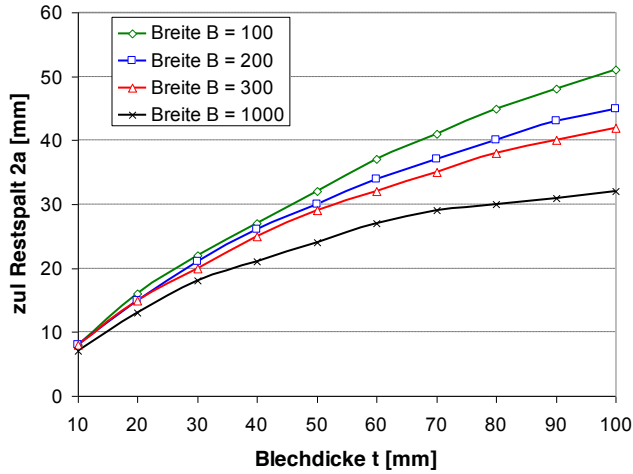


Lastniveau $\sigma_p = 0,75 \cdot f_y(t)$

B = 200 mm

Gütegruppe S355J2

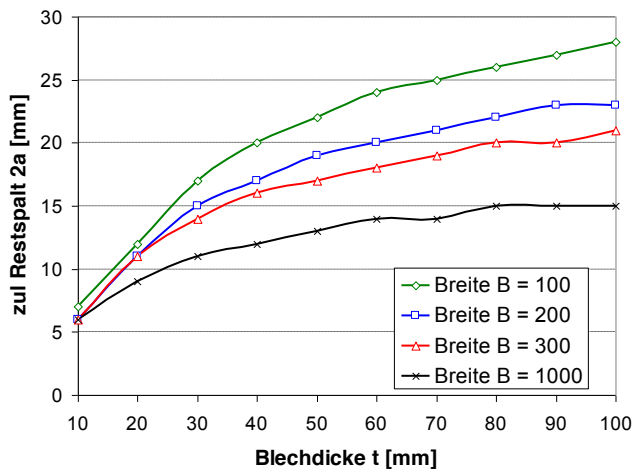
Bild D-1 zul. $2a_{stat}$ für DHY-Nähte und für innenliegende und außenliegende Bauteile



Lastniveau $\sigma_p = 0,25 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

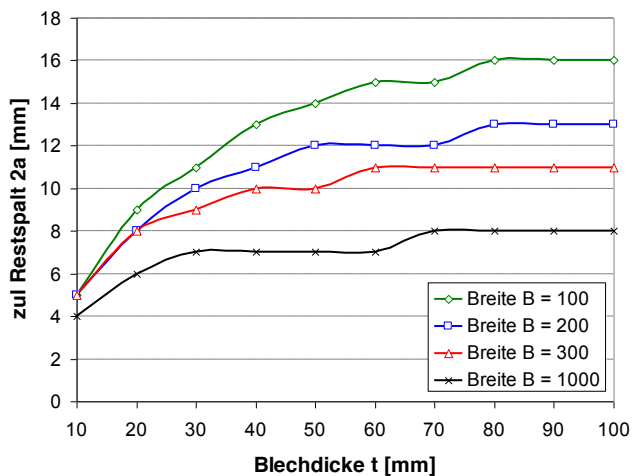
Gütegruppe S355J2



Lastniveau $\sigma_p = 0,50 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

Gütegruppe S355J2

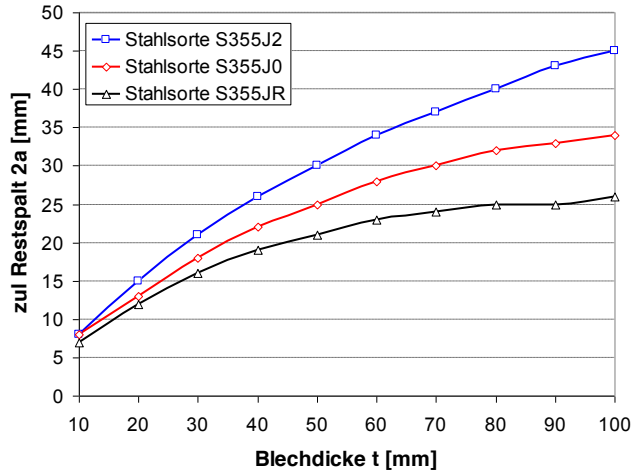


Lastniveau $\sigma_p = 0,75 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

Gütegruppe S355J2

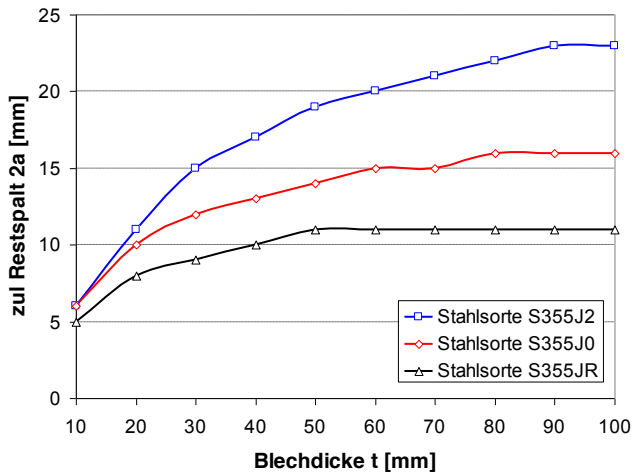
Bild D-2 zul. $2a_{stat}$ für DHY-Nähte und für variierende Bauteilbreiten



Lastniveau $\sigma_p = 0,25 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

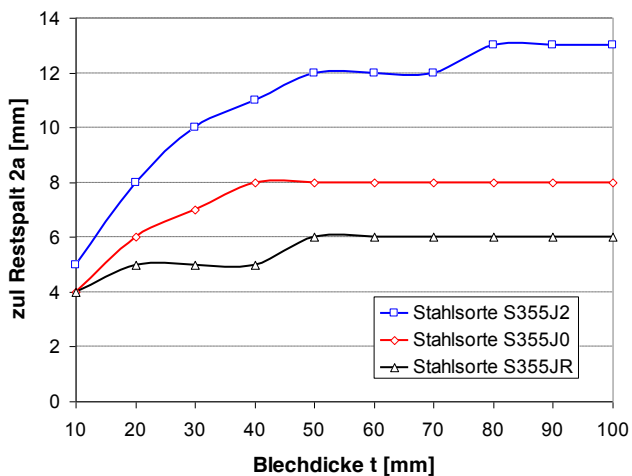
B = 200 mm



Lastniveau $\sigma_p = 0,5 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

B = 200 mm



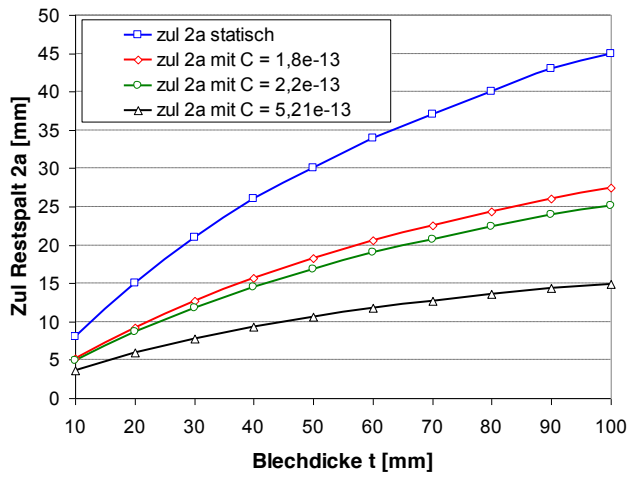
Lastniveau $\sigma_p = 0,75 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

B = 200 mm

Bild D-3 zul. $2a_{stat}$ für DHY-Nähte und für variierende Stahlsorten

Anhang D.2 Stumpfstöße mit DHY-Schweißnaht unter nicht ruhender Beanspruchung



Lastniveau $\sigma_p = 0,25 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

B = 200 mm

Gütegruppe S355J2

$\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$

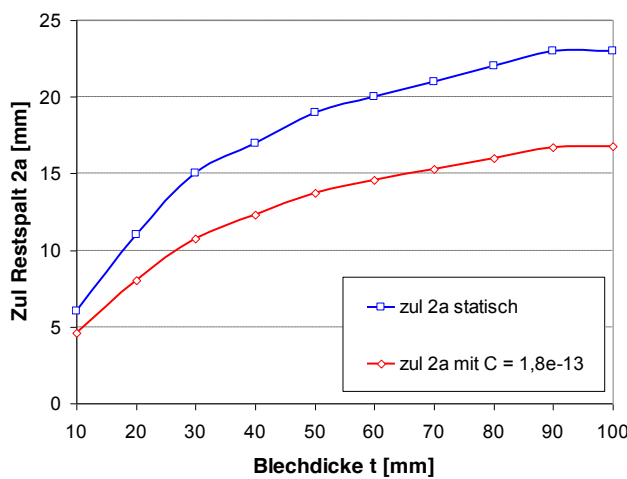
$N = 2 \cdot 10^6$

m = 3

$C = 1,80 \cdot 10^{-13}$

$C = 2,20 \cdot 10^{-13}$

$C = 5,21 \cdot 10^{-13}$



Lastniveau $\sigma_p = 0,50 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

B = 200 mm

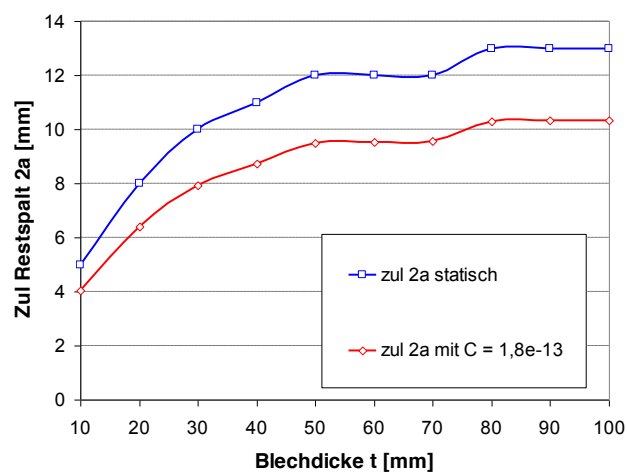
Gütegruppe S355J2

$\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$

$N = 2 \cdot 10^6$

m = 3

$C = 1,80 \cdot 10^{-13}$



Lastniveau $\sigma_p = 0,75 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

B = 200 mm

Gütegruppe S355J2

$\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$

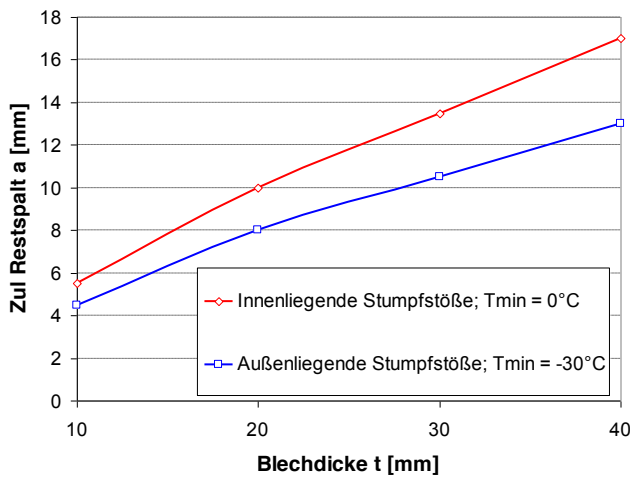
$N = 2 \cdot 10^6$

m = 3

$C = 1,80 \cdot 10^{-13}$

Bild D-4 zul. 2a_{zykl} für DHY-Nähte für Ermüdungsbeanspruchung

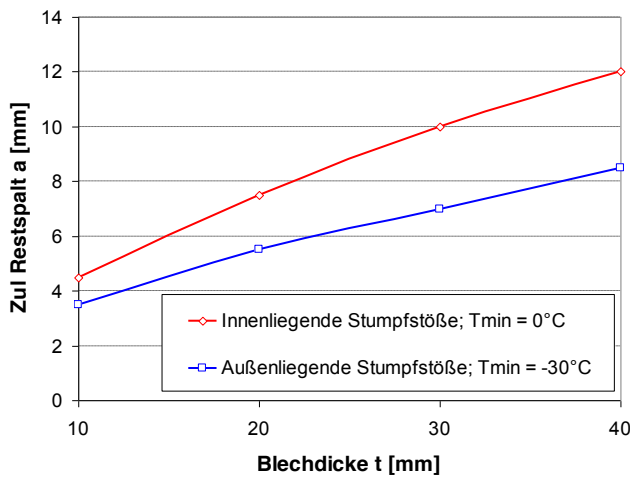
Anhang D.3 Stumpfstöße mit HY-Schweißnaht unter vorwiegend ruhender Beanspruchung



Lastniveau $\sigma_p = 0,25 \cdot f_y(t)$

B = 200 mm

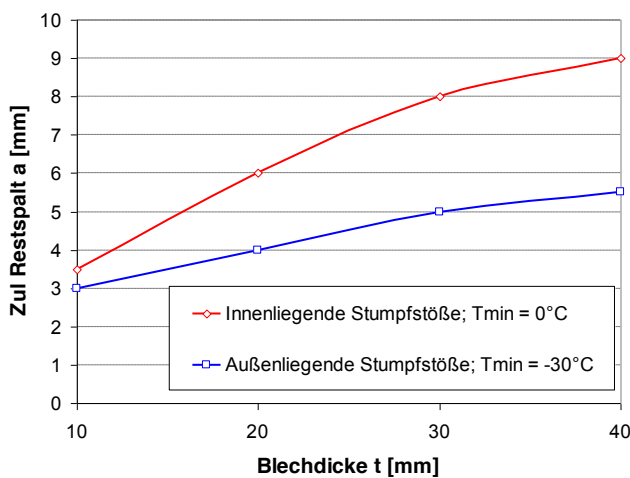
Gütegruppe S355J2



Lastniveau $\sigma_p = 0,50 \cdot f_y(t)$

B = 200 mm

Gütegruppe S355J2

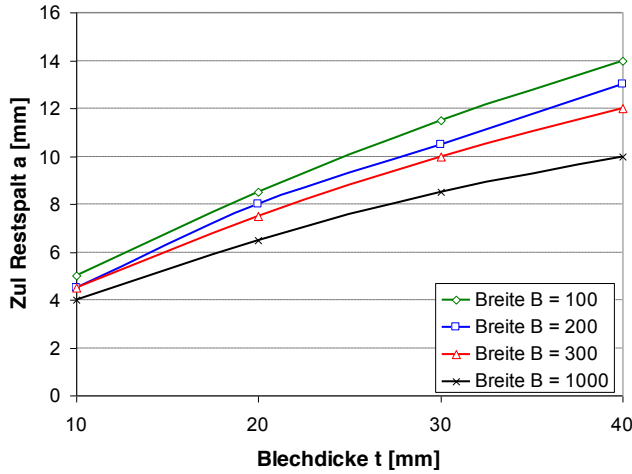


Lastniveau $\sigma_p = 0,75 \cdot f_y(t)$

B = 200 mm

Gütegruppe S355J2

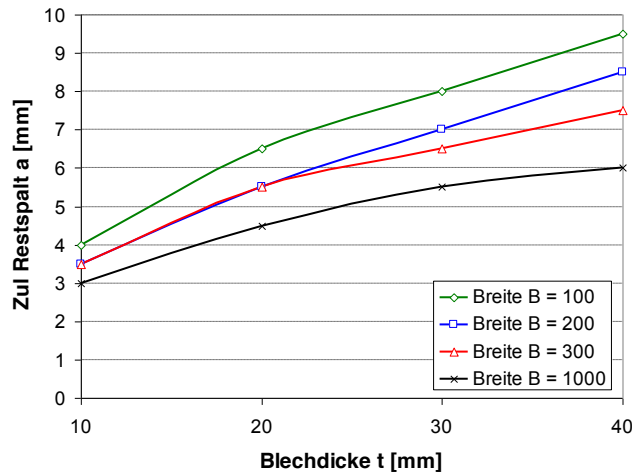
Bild D-5 zul. 2a für HY-Nähte und für innenliegende und außenliegende Bauteile



Lastniveau $\sigma_p = 0,25 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ } ^\circ\text{C}$

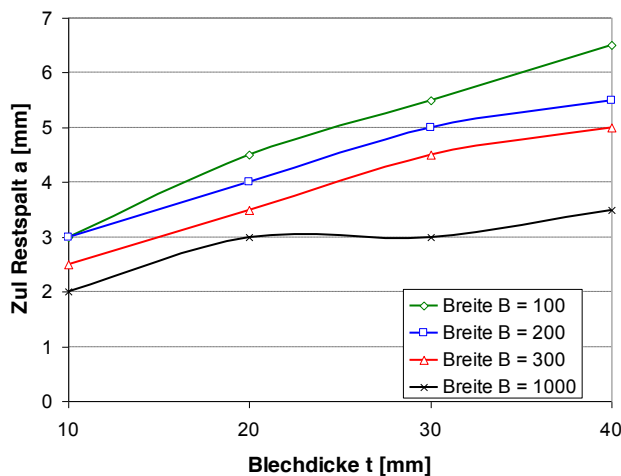
Gütegruppe S355J2



Lastniveau $\sigma_p = 0,50 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Gütegruppe S355J2

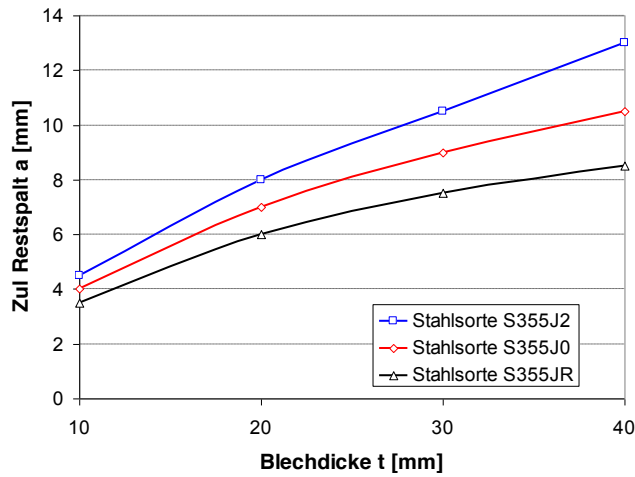


Lastniveau $\sigma_p = 0,75 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Gütegruppe S355J2

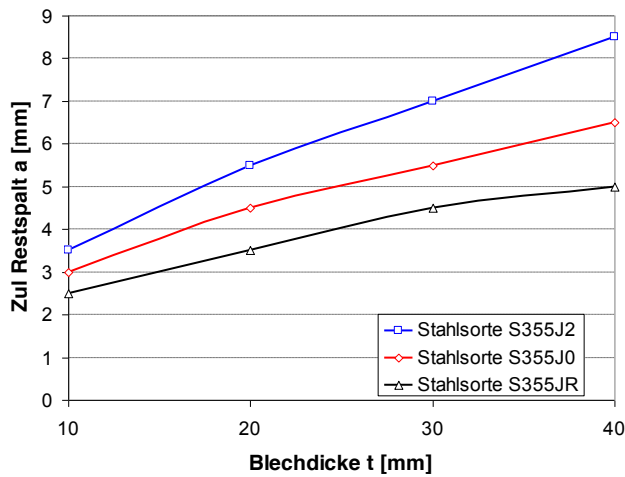
Bild D-6 zul. 2a für HY-Nähte und für variierende Bauteilbreiten



Lastniveau $\sigma_p = 0,25 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

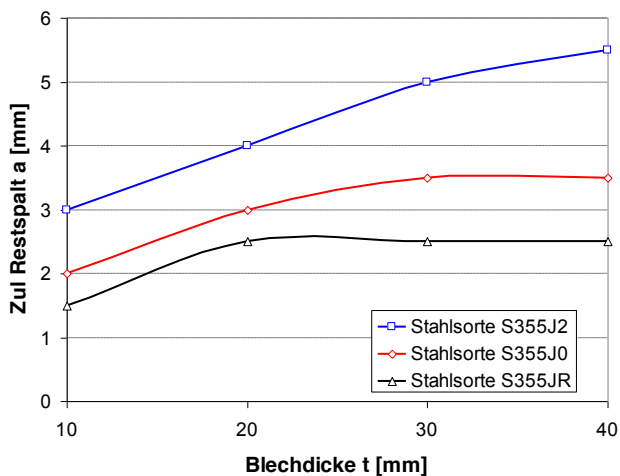
B = 200 mm



Lastniveau $\sigma_p = 0,5 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

B = 200 mm



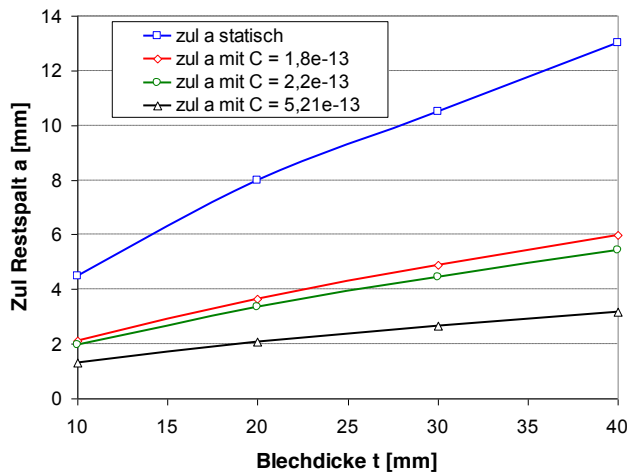
Lastniveau $\sigma_p = 0,75 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

B = 200 mm

Bild D-7 zul. 2a für HY-Nähte und für variierende Stahlsorten

Anhang D.4 Stumpfstöße mit HY-Schweißnaht unter nicht ruhender Beanspruchung



Lastniveau $\sigma_p = 0,25 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

$B = 200 \text{ mm}$

Gütegruppe S355J2

$\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$

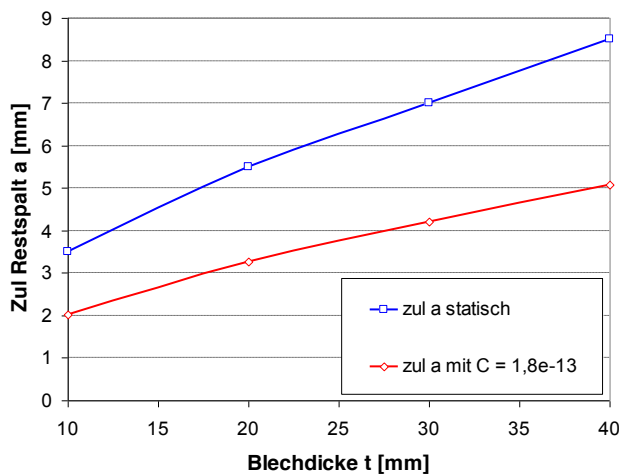
$N = 2 \cdot 10^6$

$m = 3$

$C = 1,80 \cdot 10^{-13}$

$C = 2,20 \cdot 10^{-13}$

$C = 5,21 \cdot 10^{-13}$



Lastniveau $\sigma_p = 0,50 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

$B = 200 \text{ mm}$

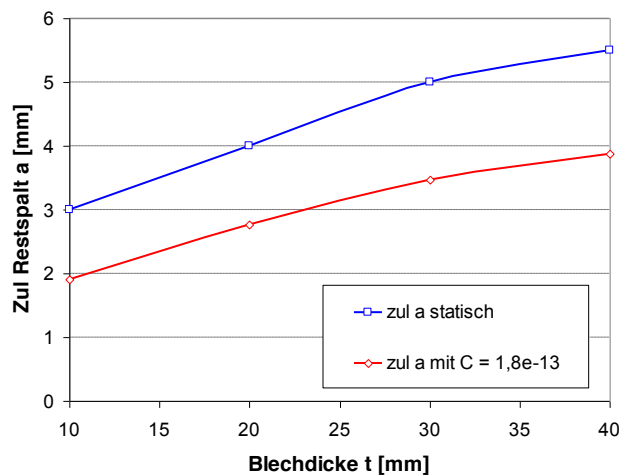
Gütegruppe S355J2

$\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$

$N = 2 \cdot 10^6$

$m = 3$

$C = 1,80 \cdot 10^{-13}$



Lastniveau $\sigma_p = 0,75 \cdot f_y(t)$

$T_{min} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

$B = 200 \text{ mm}$

Gütegruppe S355J2

$\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$

$N = 2 \cdot 10^6$

$m = 3$

$C = 1,80 \cdot 10^{-13}$

Bild D-8 zul. $2a_{zykl}$ für HY-Nähte für Ermüdungsbeanspruchung

Anhang E Ultraschalluntersuchungen und Bruchflä- chenanalyse

Vorgehen bei den Ultraschalluntersuchungen

Sowohl die Kreuzstöße als auch die Stumpfstoßproben wurden von zwei Einschallpositionen untersucht, vgl. Abschnitt 6.3, Bild 6-11.

Bei den Kreuzstoßproben wurden dabei zwei Restspalte gemessen, von der Position 1 der linke Spalt und von der Position 2 der rechte Restspalt. Die Messung erfolgte alle 20 mm, wobei an den Rändern keine Messungen möglich waren. Eine Messserie bestand somit in der Regel aus 9 Messwerten.

An den Stumpfstoßproben wurde auch von zwei Seiten gemessen, im Vergleich zu den Kreuzstoßproben jedoch derselbe Restspalt. Einschallposition 1 bezeichnet dabei die Messung von der senkrechten Spaltseite, Einschallposition 2 die Messung von der angefasten Restspaltseite. Auch hier wurde alle 20 mm gemessen.

Bruchflächenauswertung

In Bild E-1 sind beispielhaft an der Bruchfläche der Probe DHY-N5 die Auswertepositionen im 20 mm-Raster dargestellt, an denen jeweils die Restspaltgrößen sowie die resultierende Rissgrößen bestimmt wurden. Zudem wurde die relative Lage der Restspalte und der Rissfronten innerhalb der Proben bezogen auf die Bauteilober- bzw. unterkante bestimmt.

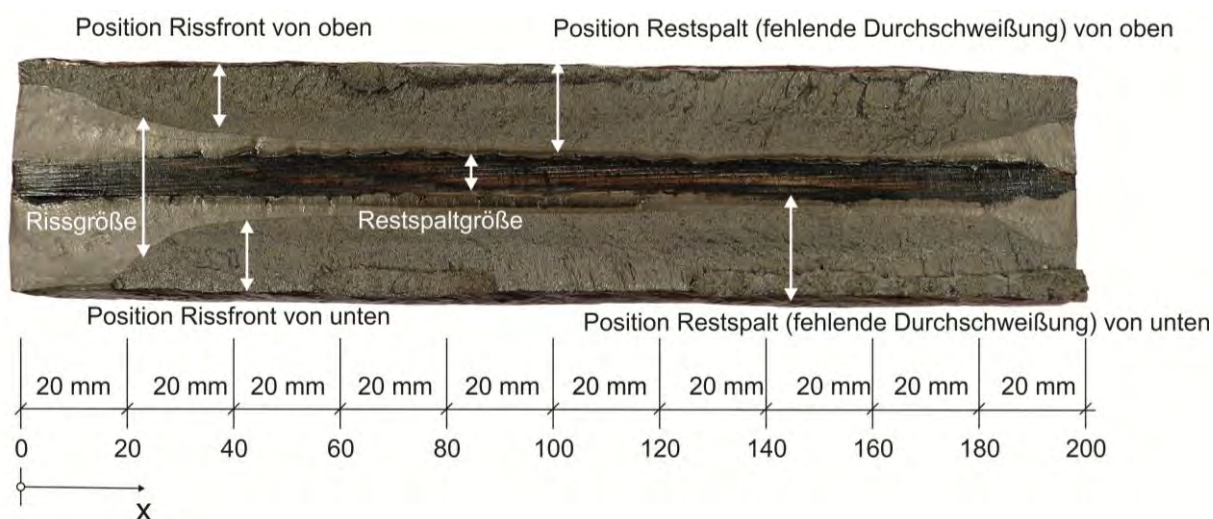
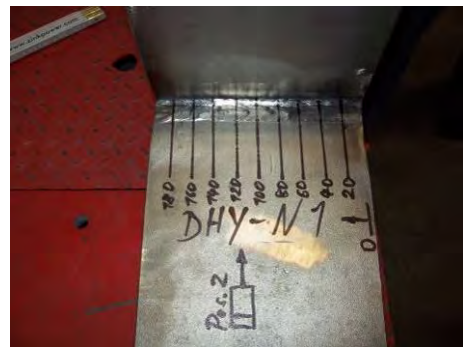


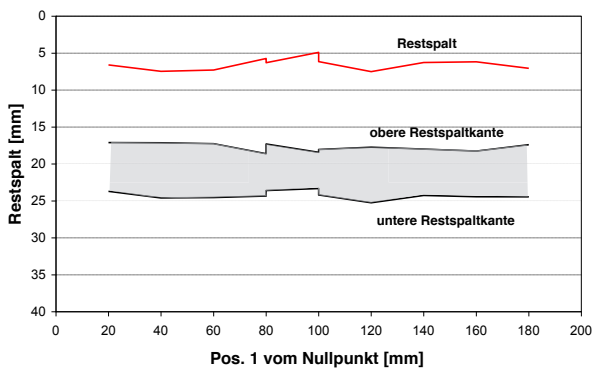
Bild E-1 Darstellung der Positionen bei der Auswertung der Bruchflächen

Anhang E.1 Restspaltmessung an Kreuzstoßverbindungen DHY-N1

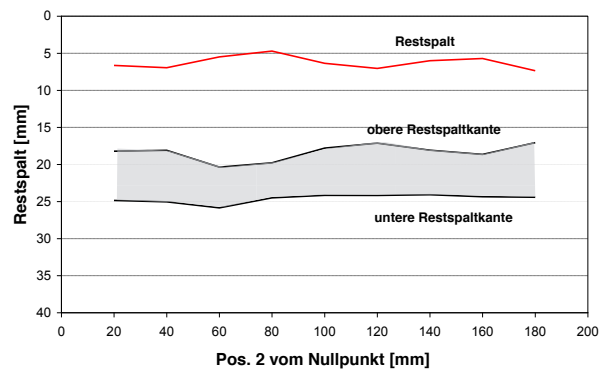
Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
1	20	6,60	20	6,64
2	40	7,46	40	6,95
3	60	7,29	60	5,49
4	80	5,73 6,30 ^{*)}	80	4,71
5	100	4,90 6,15	100	6,36
6	120	7,51	120	7,05
7	140	6,27	140	6,00
8	160	6,17	160	5,70
9	180	7,06	180	7,36



^{*)} Kontrollmessung



a)



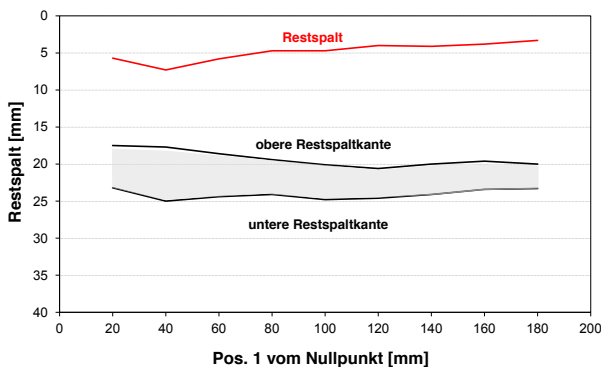
b)

Bild E-2 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N1: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

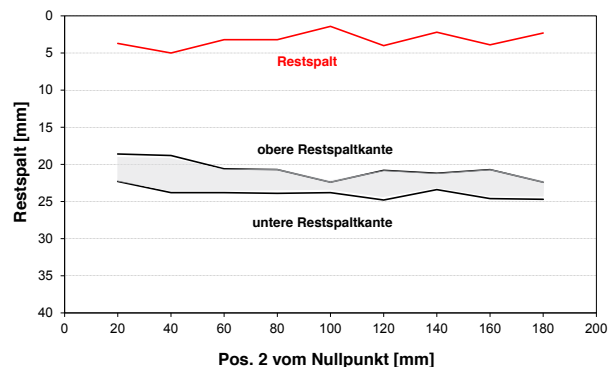
DHY-N1-2

Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
0	0	-	0	-
1	20	5,70	20	3,70
2	40	7,30	40	5,00
3	60	5,80	60	3,20
4	80	4,70	80	3,20
5	100	4,70	100	1,40
6	120	4,00	120	4,00
7	140	4,10	140	2,20
8	160	3,80	160	3,90
9	180	3,30	180	2,30
10	200	-	200	-

Ergebnis Bruchflächenanalyse
Restspalt [mm]
5,11
5,42
6,75
6,17
5,13
5,19
4,99
4,18
5,05
5,67
5,61



a)



b)

Bild E-3 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N1-2: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

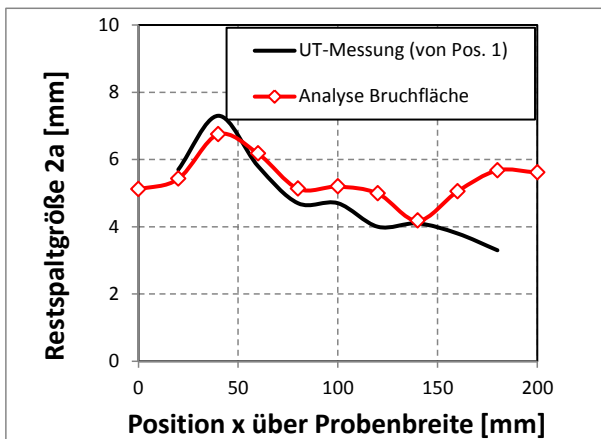
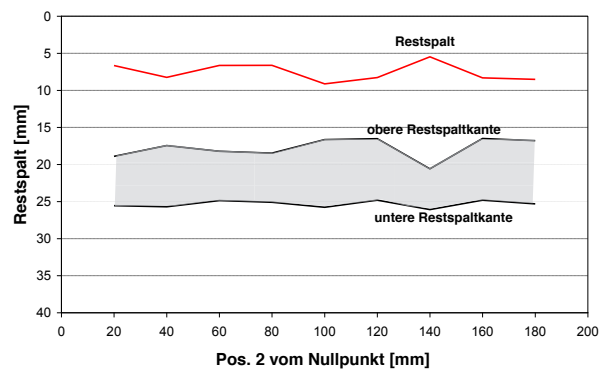
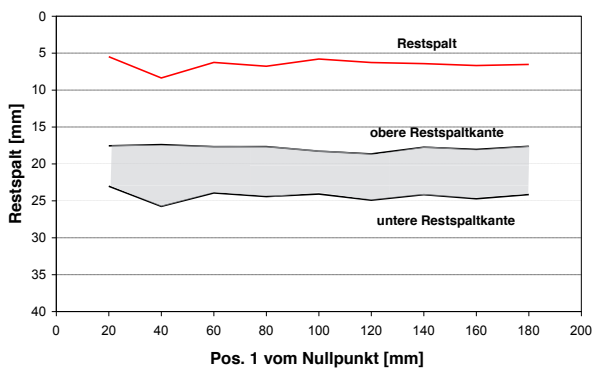


Bild E-4 Vergleich der mit UT und der aus der Bruchfläche ermittelten Restspaltgröße an der Probe DHY-N1-2

DHY-N2

Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
1	20	5,48	20	6,65
2	40	8,37	40	8,25
3	60	6,26	60	6,64
4	80	6,77	80	6,63
5	100	5,80	100	9,13
6	120	6,27	120	9,28
7	140	6,42	140	5,48
8	160	6,68	160	8,32
9	180	6,53	180	8,52



a)

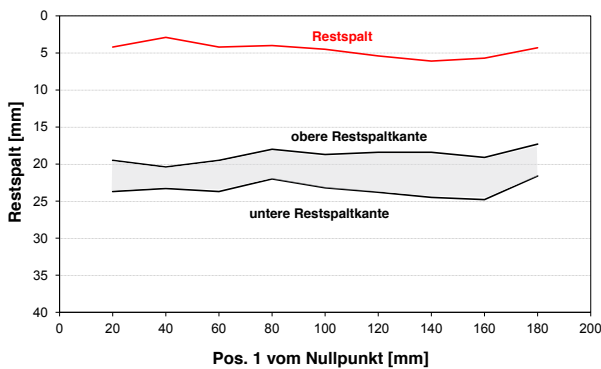
b)

Bild E-5 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N2: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

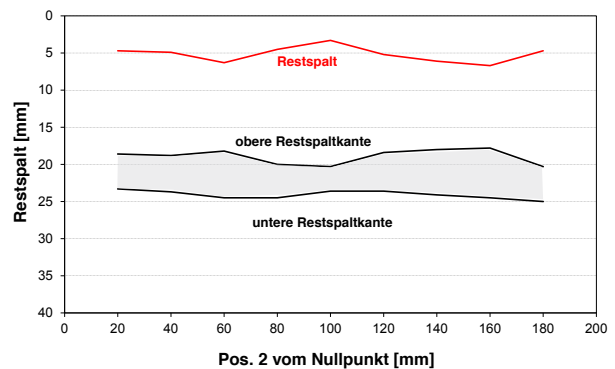
DHY-N2-2

Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
0	0	-	0	-
1	20	4,20	20	4,70
2	40	2,90	40	4,90
3	60	4,20	60	6,30
4	80	4,00	80	4,50
5	100	4,50	100	3,30
6	120	5,40	120	5,20
7	140	6,10	140	6,10
8	160	5,70	160	6,70
9	180	4,30	180	4,70
10	200	-	200	-

Ergebnis Bruchflächenanalyse	
Restspalt [mm]	
5,27	
4,97	
5,82	
6,43	
6,00	
3,88	
5,81	
4,60	
6,00	
6,12	
5,82	



a)



b)

Bild E-6 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N2-2: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

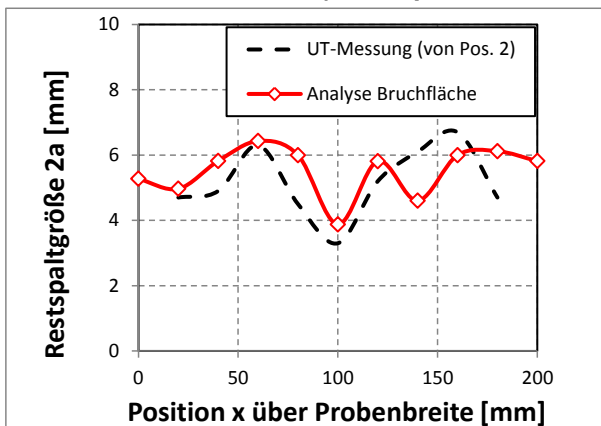
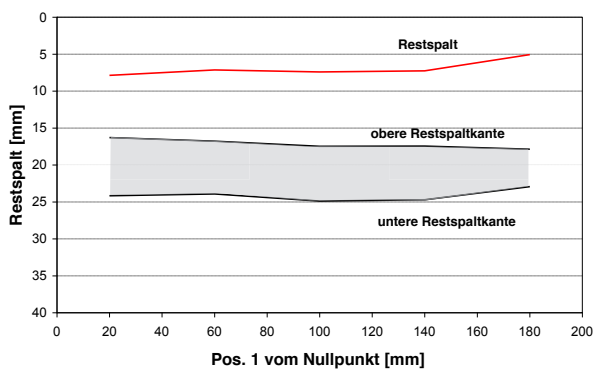


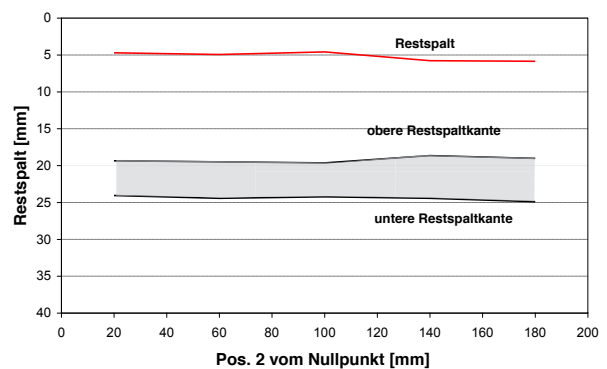
Bild E-7 Vergleich der mit UT und der aus der Bruchfläche ermittelten Restspaltgröße an der Probe DHY-N2-2

DHY-N3

Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
1	20	7,87	20	4,71
2	40	nicht gemessen	40	nicht gemessen
3	60	7,14	60	4,93
4	80	nicht gemessen	80	nicht gemessen
5	100	7,41	100	4,59
6	120	nicht gemessen	120	nicht gemessen
7	140	7,26	140	5,78
8	160	nicht gemessen	160	nicht gemessen
9	180	5,06	180	5,86

UT-Messungen

a)

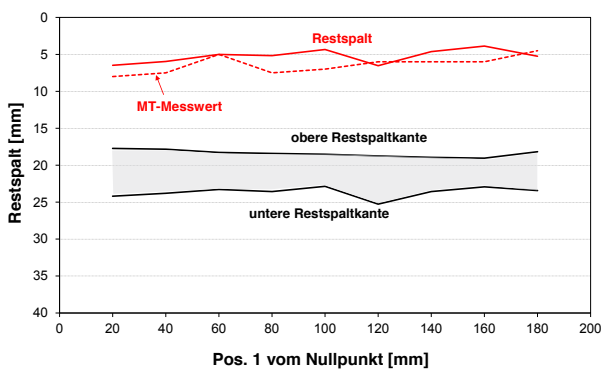


b)

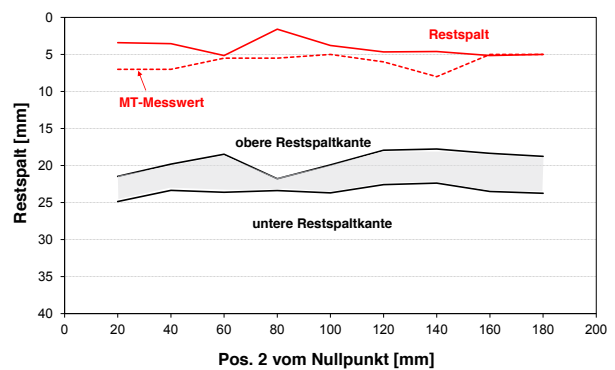
Bild E-8 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N3: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

DHY-N3-2

Nr.	Pos. 1	Restspalt		Abweichung		Pos. 2	Restspalt		Abweichung		
		UT [mm]	MT [mm]	[mm]	[%]		UT [mm]	MT [mm]	[mm]	[%]	
1	20	6,48	8,0	1,52	19,0	20	3,40	7,0	3,60	51,4	
2	40	5,96	7,5	1,54	20,5	40	3,54	7,0	3,46	49,4	
3	60	5,01	5,0	0,01	0,2	60	5,14	5,5	0,36	6,5	
4	80	5,17	7,5	2,33	31,1	80	1,59	5,5	3,91	71,1	
5	100	4,34	7,0	2,66	38,0	100	3,79	5,0	1,21	24,2	
6	120	6,53	6,0	0,53	8,8	120	4,65	6,0	1,35	22,5	
7	140	4,63	6,0	13,37	22,8	140	4,60	8,0	3,40	42,5	
8	160	3,88	6,0	2,12	35,3	160	5,15	5,5	0,15	3,0	
9	180	5,25	4,5	0,75	16,7	180	4,99	5,5	0,01	0,2	
				1,4	21,4					1,9	30,1



a)



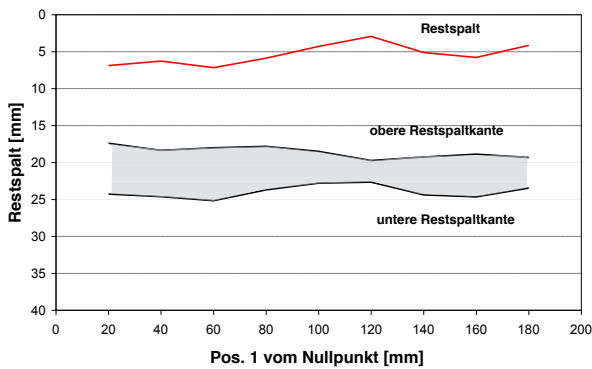
b)

Bild E-9 Magnetpulverprüfung sowie Ultraschallmessung an der Probe DHY-N3-2: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

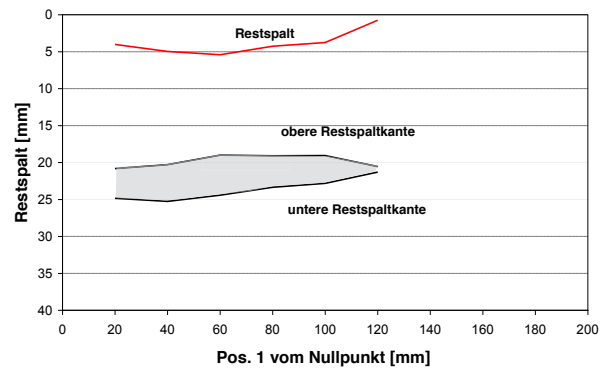
Anhang E.2 Restspaltmessung an Stumpfstoßverbindungen DHY-N4

Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
0	0	-	0	-
1	20	6,88	20	4,01
2	40	6,27	40	4,96
3	60	7,17	60	5,42
4	80	5,88	80	4,26
5	100	4,29	100	3,76
6	120	2,93	120	0,75
7	140	5,12	140	nicht gemessen
8	160	5,78	160	nicht gemessen
9	180	4,14	180	nicht gemessen
10	200	-	200	-

Ergebnis Bruchflächenanalyse
Restspalt [mm]
7,32
6,17
6,43
5,41
5,53
5,09
5,09
6,55
6,43
5,28
5,09



a)



b)

Bild E-10 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N4: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

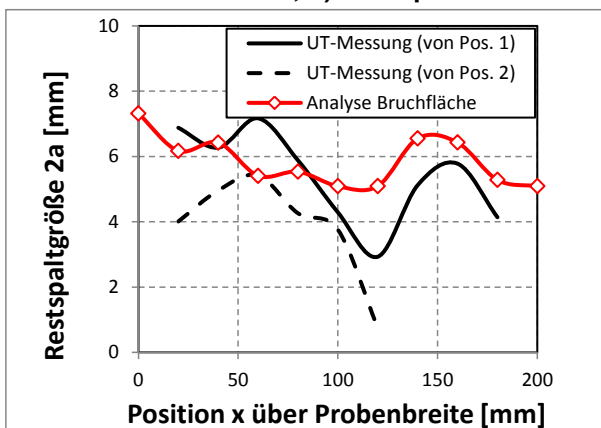


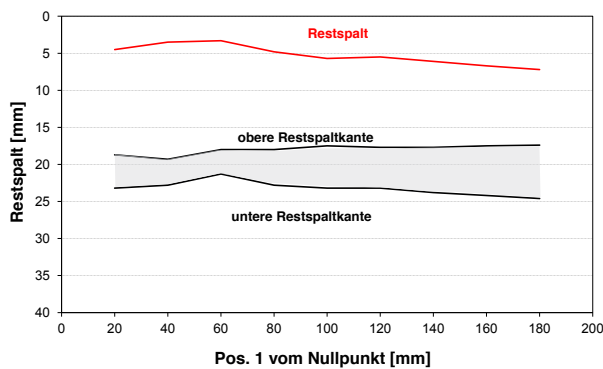
Bild E-11 Vergleich der mit UT und der aus der Bruchfläche ermittelten Restspaltgröße an der Probe DHY-N4



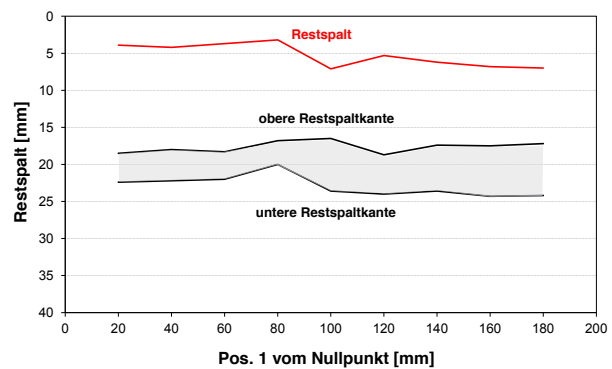
DHY-N4-2

Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
0	0	-	0	-
1	20	4,50	20	3,90
2	40	3,50	40	4,20
3	60	3,30	60	3,70
4	80	4,80	80	3,20
5	100	5,70	100	7,10
6	120	5,50	120	5,30
7	140	6,10	140	6,20
8	160	6,70	160	6,80
9	180	7,20	180	7,00
10	200	-	200	-

Ergebnis Bruchflächenanalyse	
Restspalt [mm]	
5,10	
4,45	
4,57	
4,86	
6,41	
6,65	
6,65	
6,11	
5,69	
6,71	
5,30	



a)



b)

Bild E-12 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N4-2: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

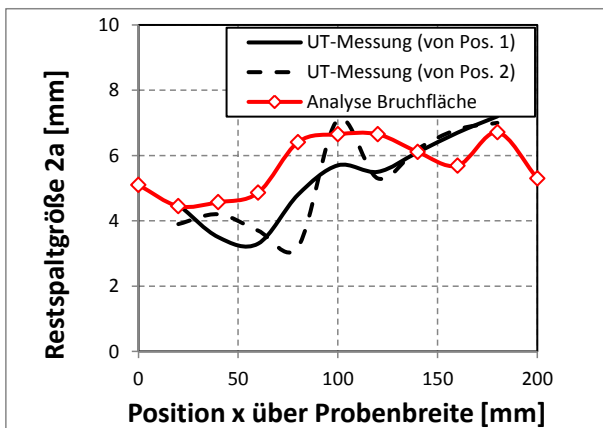
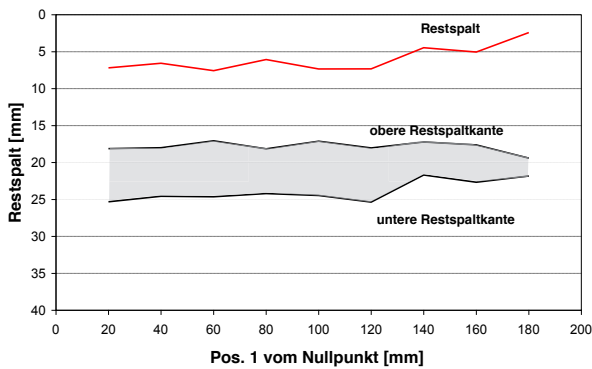


Bild E-13 Vergleich der mit UT und der aus der Bruchfläche ermittelten Restspaltgröße an der Probe DHY-N4-2

DHY-N5

Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
0	0	-	0	-
1	20	7,19	20	nicht gemessen
2	40	6,57	40	nicht gemessen
3	60	7,57	60	nicht gemessen
4	80	6,06	80	nicht gemessen
5	100	7,34	100	nicht gemessen
6	120	7,33	120	nicht gemessen
7	140	4,46	140	nicht gemessen
8	160	5,05	160	nicht gemessen
9	180	2,42	180	nicht gemessen
10	200	-	200	-

Restspalt [mm]
6,07
7,03
6,88
7,71
7,41
7,02
6,33
7,43
7,25
6,93
2,85



nicht gemessen

a)

b)

Bild E-14 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N5: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

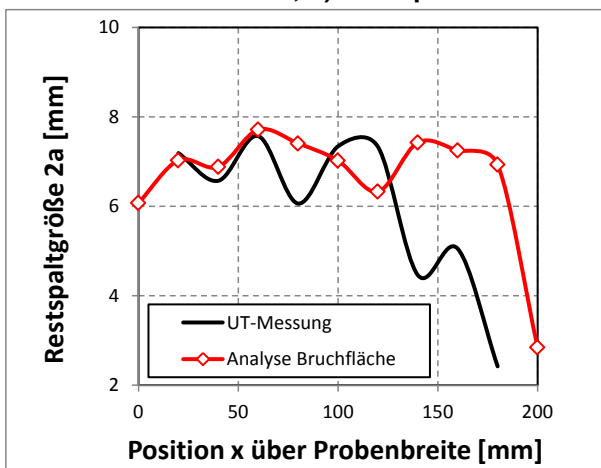
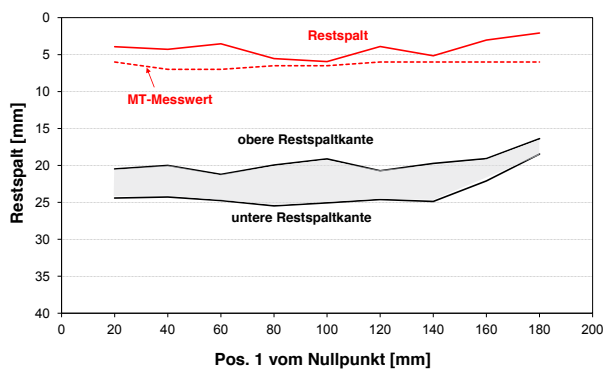


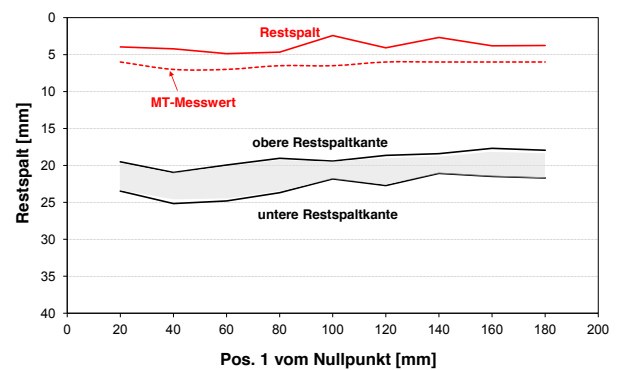
Bild E-15 Vergleich der mit UT und der aus der Bruchfläche ermittelten Restspaltgröße an der Probe DHY-N5

DHY-N5-2

Nr.	Pos. 1	Restspalt		Abweichung		Pos. 2	Restspalt		Abweichung		
		UT	MT	[mm]	[%]		UT	MT	[mm]	[%]	
		[mm]	[mm]				[mm]	[mm]			
1	20	3,93	6,0	2,1	34,5	20	3,96	6,0	2,0	34,0	
2	40	4,28	7,0	2,7	38,9	40	4,21	7,0	2,8	39,9	
3	60	3,54	7,0	3,5	49,4	60	4,87	7,0	2,1	30,4	
4	80	5,53	6,5	1,0	14,9	80	4,66	6,5	1,8	28,3	
5	100	5,95	6,5	0,6	8,5	100	2,42	6,5	4,1	62,8	
6	120	3,90	6,0	2,1	35,0	120	4,08	6,0	1,9	32,0	
7	140	5,15	6,0	0,9	14,2	140	2,68	6,0	3,3	55,3	
8	160	3,03	6,0	3,0	49,5	160	3,80	6,0	2,2	36,7	
9	180	2,08	6,0	3,9	65,3	180	3,76	6,0	2,2	37,3	
				2,2	34,5					2,5	39,6



a)



b)

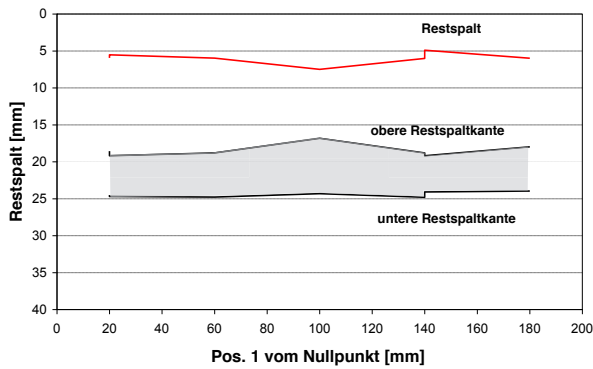
Bild E-16 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N5-2: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

DHY-N6

Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
1	20	5,94 5,52 ^{*)}	20	nicht gemessen
2	40	nicht gemessen	40	nicht gemessen
3	60	5,97	60	nicht gemessen
4	80	nicht gemessen	80	nicht gemessen
5	100	7,49	100	nicht gemessen
6	120	nicht gemessen	120	nicht gemessen
7	140	6,01 4,90 ^{*)}	140	nicht gemessen
8	160	nicht gemessen	160	nicht gemessen
9	180	5,98	180	nicht gemessen



^{*)} Kontrollmessung



Restspalt von Pos. 1 gemessen

Restspalt von Pos. 2 gemessen

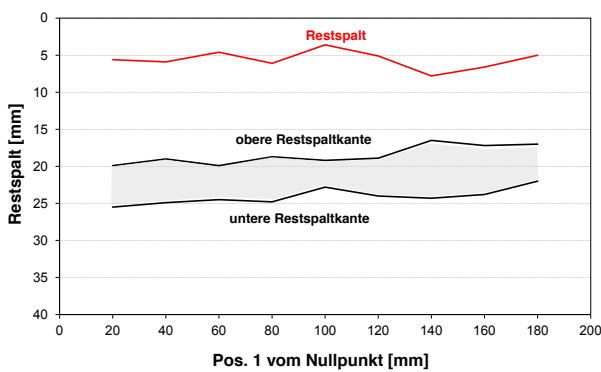
nicht gemessen

Bild E-17 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N6: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

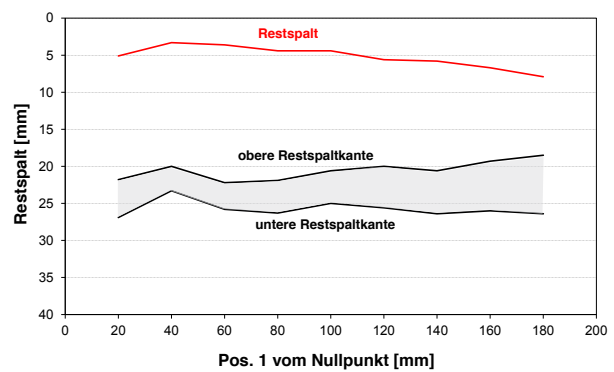
DHY-N6-2

Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
0	0	-	0	-
1	20	5,60	20	5,10
2	40	5,90	40	3,30
3	60	4,60	60	3,60
4	80	6,10	80	4,40
5	100	3,60	100	4,40
6	120	5,10	120	5,60
7	140	7,80	140	5,80
8	160	6,60	160	6,70
9	180	5,00	180	7,90
10	200	-	200	-

Ergebnis Bruchflächenanalyse	
Restspalt [mm]	
5,28	
6,62	
4,24	
5,34	
5,57	
4,87	
5,05	
6,26	
4,84	
4,83	
5,28	



a)



b)

Bild E-18 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N6-2: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

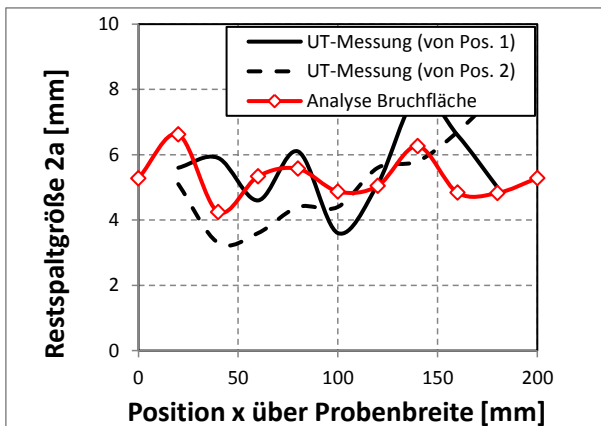


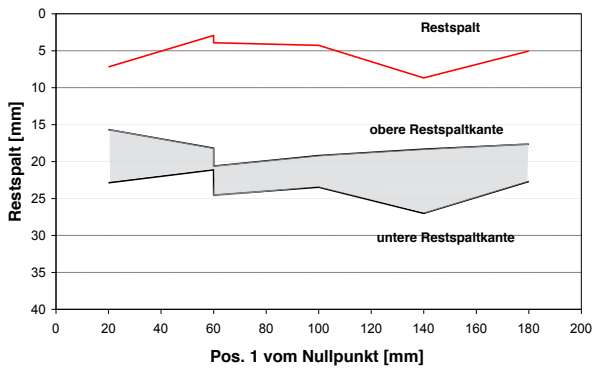
Bild E-19 Vergleich der mit UT und der aus der Bruchfläche ermittelten Restspaltgröße an der Probe DHY-N6-2

DHY-N7

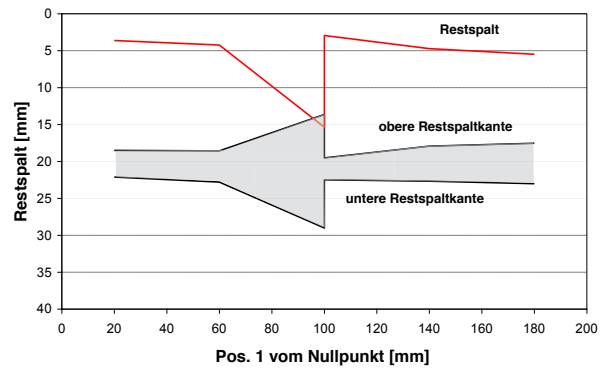
Ergebnis der Ultraschallmessung				
Nr.	Pos. 1	Restspalt [mm]	Pos. 2	Restspalt [mm]
1	20	7,19	20	3,62
2	40	nicht gemessen	40	nicht gemessen
3	60	2,93 3,92 ^{*)}	60	4,23
4	80	nicht gemessen	80	nicht gemessen
5	100	4,28	100	15,37 2,95 ^{*)}
6	120	nicht gemessen	120	nicht gemessen
7	140	8,68	140	4,73
8	160	nicht gemessen	160	nicht gemessen
9	180	5,05	180	5,48



^{*)} Kontrollmessung



a)



b)

Bild E-20 Ultraschallmessung an der Probe DHY-N7: a) Restspalt rechts von Pos. 1 gemessen, b) Restspalt links von Pos. 2 gemessen

Anhang E.3 Auswertung der Rissfronten

Rissfronten konnten nur eindeutig an der Kreuzstoßprobe DHY-N5, sowie an den Stumpfstoßproben DHY-N4-2 und DHY-N6-2 ermittelt werden.

DHY-N4-2

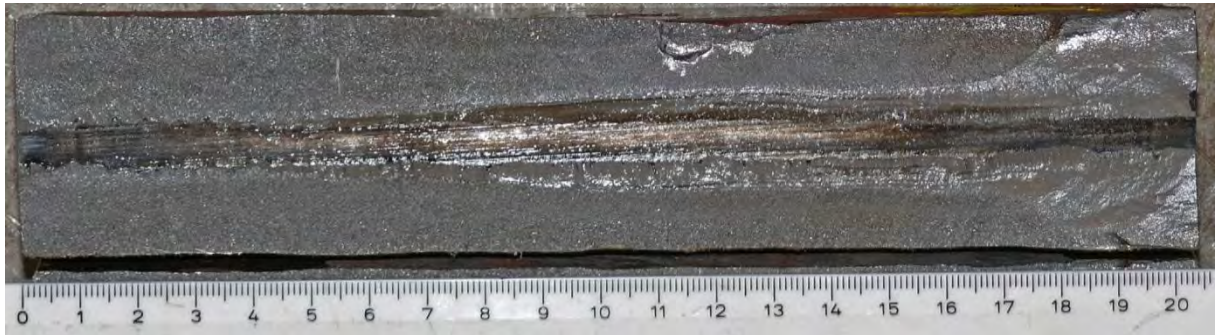


Bild E-21 Bruchfläche der Probe DHY-N4-2

	Position über Probenbreite in [mm]										
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
obere Rissfront	20,17	18,52	18,92	19,05	14,77	13,64	11,57	13,11	12,40	1,91	0,00
untere Rissfront	25,09	24,67	26,33	27,97	28,41	29,77	29,54	29,65	31,12	36,79	40,75
Rissgröße	4,92	6,15	7,41	8,92	13,64	16,13	17,96	16,55	18,73	34,89	40,75

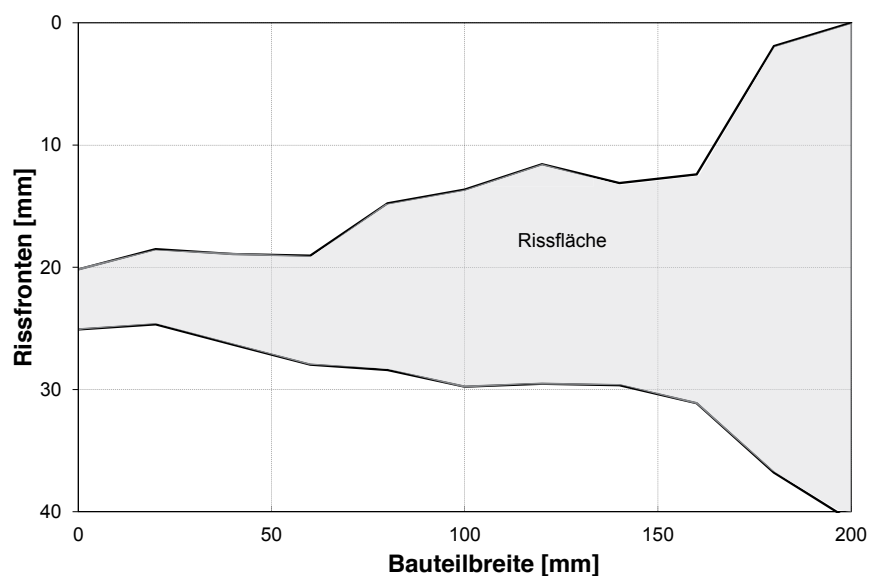


Bild E-22 Graphische Darstellung des Verlaufs der Rissfront der Probe DHY-N4-2 über die Probenbreite

DHY-N5

Bild E-23 Bruchfläche der Probe DHY-N5

	Position über Probenbreite in [mm]										
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
obere Rissfront	4,03	9,17	12,29	13,78	14,45	14,51	15,04	15,15	15,27	12,35	8,64
untere Rissfront	40,00	37,98	28,00	27,39	26,95	26,34	26,31	25,78	26,13	27,56	32,64
Rissgröße	35,97	28,82	15,71	13,61	12,50	11,83	11,27	10,63	10,86	15,21	24,00

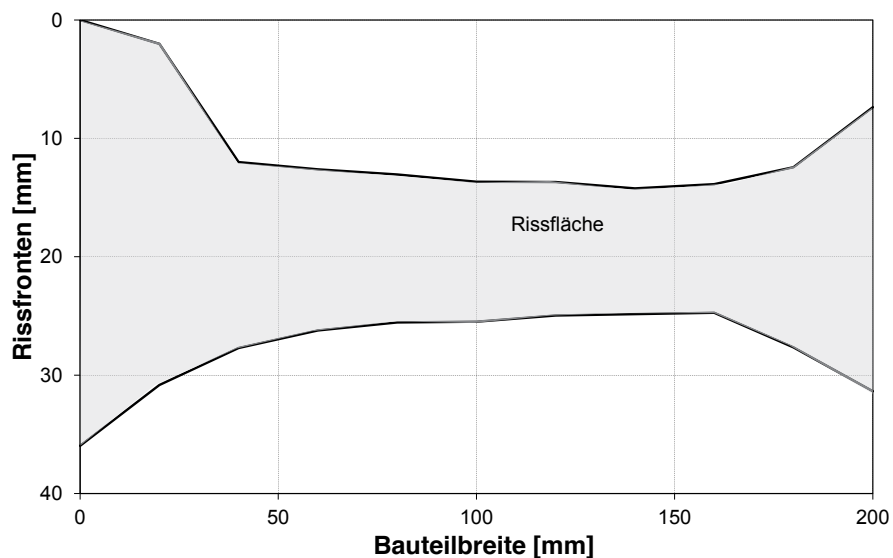
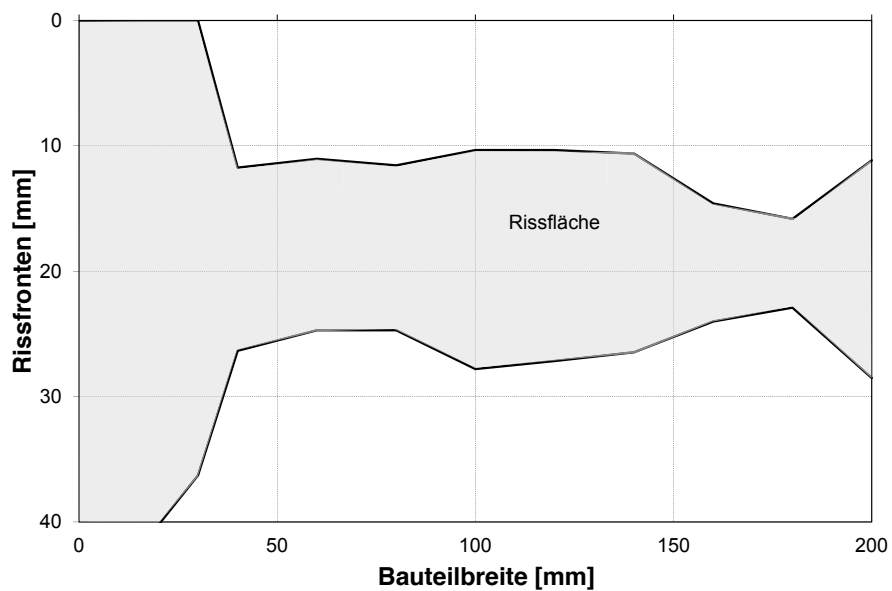


Bild E-24 Graphische Darstellung des Verlaufs der Rissfront der Probe DHY-N5 über die Probenbreite

DHY-N6-2**Bild E-25** Bruchfläche der Probe DHY-N6-2

	Position über Probenbreite in [mm]										
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
obere Rissfront	0,00	0,00	11,74	11,04	11,56	10,34	10,34	10,63	14,60	15,83	11,16
untere Rissfront	40,25	40,25	26,35	24,71	24,71	27,81	27,17	26,47	24,01	22,90	28,51
Rissgröße	40,25	40,25	14,61	13,67	13,15	17,47	16,83	15,84	9,41	7,07	17,35

**Bild E-26** Graphische Darstellung des Verlaufs der Rissfront der Probe DHY-N6-2 über die Probenbreite

DASSt-Richtlinien

Stand: Oktober 2018

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 Stahlgütegruppen 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 (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 (6/76)	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 (2/88)	überholt
013	Beulsicherheitsnachweise für Schalen (7/80)	überholt
014	Empfehlungen zum Vermeiden von Terrassenbrüchen in geschweißten Konstruktionen aus Baustahl (1/81)	gültig

Nr.	Titel	
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 – M36	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
1/2001	Stützen mit dünnwandigen Querschnittsteilen (im Bereich geringer Schlankheiten)
2/2001	Optimale Ausnutzung von Verbund-Durchlaufträgern unter besonderer Berücksichtigung nachgiebiger, teiltragfähiger Verbindungen
3/2001	Bemessung hallenbautypischer Verbindungen
4/2001	Verformungsverhalten der Komponenten von wirtschaftlichen steifenlosen Anschlusskonstruktionen für die Anwendung plastischer Bemessungskonzepte im Stahlbau
5/2001	Anziehen von 8.8-Schrauben
1/2002	Weiterentwicklung der Produktschnittstelle Stahlbau für die Anforderungen im Komplettbau
2/2002	Kontaktstöße mit Gurtlaschen
1/2003	14. DASt-Forschungskolloquium
2/2003	Experimentelle und analytische Untersuchungen an neuartigen Glas-Stahl-Verbindungen im Hinblick auf zukünftige Einsatzgebiete und Bemessungskonzepte
3/2003	Entwicklung eines Verfahrens zur Konformitätsprüfung der Produktschnittstelle Stahlbau
4/2003	Wirtschaftliche Aussteifung von Stahlkonstruktionen mit Glas zur Schubübertragung und zur Erhöhung der Filigranität der Konstruktion
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)

Nr.	Titel
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 biegedrillknickgefährdeter 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
1/2009	Effiziente Nachweisführung von biegeknickgefährdeten, dünnwandigen Stahlquerschnitten
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

Nr.	Titel
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
2/2011	Nutzung der Membranwirkung von Verbundträger-Decken-Systemen im Brandfall
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
2/2015	Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile
3/2015	Dauerhaftigkeit und Dimensionierung des Randverbundes von Mehrscheibenisolierverglasung in Abhängigkeit der Klimabelastung bei Zweifach- und Dreifachisolierverglasung - DuraSeal

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: Oktober 2018

Homepage: www.deutscherstahlbau.de
 Shop: <https://shop.deutscherstahlbau.de>
 E-Mail: contact@deutscherstahlbau.de

Berichte von 1973 - 2004

Titel	Berichtsheft / Autor	Erläuterungen
<p>Abschlußberichte</p> <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>1/1973</p> <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 Stahlnochbau • 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>

Beiträge zur Berechnung und Ausführung von Stahlkonstruktionen	6/1979 Scheer, Schumann, Ahrens, Kröplin, Schmidt, Peil, Beyer, Grassl, Langhoff, Rabe, Hering, Koch, Kanning, Koep, Born, Maier, Twelmeier, Griebenow, Harbord, Duddeck, Vollstedt	Vorträge zum 70. Geburtstag von Prof. Barbré 25.8.1977
Beiträge zur Normung Hochfeste Baustähle und Stabilität von Stahlbauteilen	7/1979 Jungbluth, Degenkolbe, Haneke, Schlüter, Seeger, Minner, Schönherr, Vogel, Scheer,	Vorträge aus der Fachsitzung I des Deutschen Stahlbautages in Düsseldorf 1978
Stahlprofilblech-Beton-Verbundplatten	8/1979 Jungbluth, Schäfer, Gräfe	
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Tragverhalten	9/1980 Scheer	Sonderdruck Vorträge aus der Fachsitzung I des Deutschen Stahlbautages Berlin 1980
Klärung des Tragverhaltens durch Bauteilversuche		
Biegedrillknicken - Erläuterungen, Versuche, Beispiele	10/1980 Lindner, Gietzelt	
Kommentar zu DIN 18 800, Teil 2 (Gelbdruck) - Stabilitätsfälle im Stahlbau - Knicken von Stäben und Stabwerken	11/1981 Vogel, Lindner	
Plattenbeulen - 8 Großversuche mit längs- und querausgesteiften Blechfeldern	12/1982 Roik, Kindmann, Schaumann	
Beiträge zu Berechnung und Konstruktion <ul style="list-style-type: none"> • Vereinfachte Stabilitätsnachweise von Stäben und Systemen • Aspekte der Gebrauchstüchtigkeit von Stahlbauten • Hohe Bauwerke aus Stahl - Statische und konstruktive Lösungen • Zukunftsaufgaben des Stahlbaues - Aufgaben für Forschung und Entwicklung 	13/1984 Roik Sedlacek Scheer Bärsch	
Bedarfslasten unversteifter Stahlbleche unter Berücksichtigung von Vorverformungen und Eigenspannungen	14/1985 Jungbluth, Friemann, Kubsch	

Beiträge zu Berechnung und Konstruktion	15/1986 Lindner, Valtinat, Baehre, Krämer	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Hamburg 1986 Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	16/1988 Baehre, Bode, Lindner, Vogel	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Karlsruhe 1988
Bericht aus Forschung, Entwicklung und Normung	17/1990 Nather, Hosser, Petersen, Degenkolbe, Kalla, Schönherr	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Nürnberg 1990
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	18/1992 Scheer, Schmidt, Sedlacek, Lietz, Dahl, Mang, Brandes, Valtinat	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Berlin 1992
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	19/1994 Sedlacek, Blank, Güsgen, Hanswille, Ehm, Fischer, Eggert	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Bonn 1994
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	20/1996 Bossenmayer, Schmidt, Peil, Hubo, Sedlacek	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Bremen 1996
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	Dokumentation 651 Bossenmayer, Hanswille, Graße, Katzung, Schaumann, Bode, Valtinat, Haydrich, Grotmann, Pasternak, Sedlacek	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Leipzig 1998
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	Dokumentation 654 Bossenmayer, Lindner, Schleich, Böhme, Bschorr, Nentwig, Cierpinski, Huber, Kuhlmann, Kühnemund, Günther, Sedlacek Laufs, Wellershof, Bohmann, Kathage	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Stuttgart 2000

Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	Dokumentation 657 Bohmann, Heinemeyer, Höhler, Keitel, Kühn, Lange, Langenberg, Lindner, Mangerig, Müller, Sedlacek, Schulz, Stötzel	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Hamburg 2002
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	Tagungsdokumentation zur Fachtagung anlässlich des Deutschen Stahlbautages Berlin 2004 Fontana, Hanswille, Keitel, Peil, Sedlacek	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Berlin 2004

dast/berichte/beran14

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
	Ausgabe A, Heft 9	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Aus Untersuchungen mit Leichtfahrbahndecken zu Straßenbrücken	Ausgabe B, Heft 9, 1938 Graf	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 10	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Untersuchungen zur Ermittlung günstiger Herstellungsbedingungen für die Baustellengröße geschweißter Brückenträger	Ausgabe B, Heft 10, 1940 Bierett	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 11	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche und Feststellungen zur Entwicklung der geschweißten Brücken	Ausgabe B, Heft 11, 1940 Graf	Berichte des DAST
	Heft 12, 1941	Berichte des DAST
Versuche mit Nietverbindungen	Heft 13, Albers	Berichte des DAST
Einfluß der Nahtform und der Schweißausführung auf die Querverspannung beim Schweißen unter Einspannung		
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 Kerbschlagbiegeversuch	Heft 15, 1943 Graf	Berichte des DAST
	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
	Heft 19, 1956 Graf / Brenner	Berichte des DAST
Versuche an Verbundträgern	Heft 20, 1957 Kuntze	Berichte des DAST
Thermodynamik des Sprödbruches und ihre Anwendung im Stahlbau		

Thermodynamik des Sprödbrechens und ihre Anwendung im Stahlbau	2. Teil, Heft 20a, 1959 Kuntze	Berichte des DAST
Der Feuerschutz im Stahlhochbau 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

DAST/Berichte/Anlage für Berichte 1915-1969