

FAT-Schriftenreihe 374

Lebensdauerbewertung von geschweißten
Verbindungselementen unter Montagevorspannung



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben "Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung" - 20818 N - der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung

Forschungsstellen

Fraunhofer Gesellschaft e. V., Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Technische Universität Darmstadt, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, Fachgebiet Werkstoffmechanik

Verbindungselemente

IGF-Vorhaben Nr.: 20818 N

Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Geschweißte Verbindungselemente, wie Bolzen und Muttern, werden zunehmend für zyklisch belastete und konstruktiv wichtige Bauteile eingesetzt. Der stetig wachsende Anwendungsbereich umfasst neben vielen anderen auch den Automobilbau zur Verbindung von Fahrwerkskomponenten. Die Schwingfestigkeit gilt als ein wesentliches Kriterium für die Auslegung von geschweißten Verbindungselementen. Derzeit gibt es keine allgemein gültigen Regeln für den rechnerischen Nachweis der Schwingfestigkeit von belasteten geschweißten Verbindungselementen, insb. unter zusätzlicher Berücksichtigung der Montagevorspannung.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, numerische Verfahren zur Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen aus Stahl unter Verwendung des Kerbspannungs- und Strukturspannungskonzeptes zu entwickeln. Hierfür wurden Schwingfestigkeitsversuche (reine Axialzugbelastung ohne Vorspannung und Schrägzugbelastung unter Vorspannung) an Schweißmutter- und Schweißbolzenverbindungen durchgeführt. Dabei wurde neben einem normalfesten Baustahl auch ein hochfester Dualphasenstahl untersucht. Der Einfluss von Montagevorspannungen und deren Abbau infolge zyklischer Belastungen sowie der Einfluss unterschiedlicher Blechdicken und Belastungszustände war ebenfalls Teil der Untersuchung.

Bereits infolge der untersuchten Typen der Verbindungselemente zeigt sich ein grundlegender Unterschied bezüglich der eingeleiteten Vorspannkraft. Während bei geschweißten Bolzenproben die Vorspannkraft gegen das Grundblech aufgebracht wird und sich dieses in Abhängigkeit von seiner Dicke und dem Werkstoff verformt, wirkt die Vorspannkraft bei den Mutterproben gegen den Flansch der Muttern, woraus sich für diese Proben Typen Unterschiede im Schwingfestigkeitsverhalten einstellen. Bei Bolzenproben unter schräger Zugbelastung (von 45 °) wird bspw. ein frühzeitiger Abfall der Vorspannkraft festgestellt, was sich negativ auf die Schwingfestigkeit auswirkt. Lediglich zwei übergreifende Erkenntnisse lassen sich festhalten: (a) Die ertragbare Kraftamplitude steigt

mit zunehmender Vorspannkraft und (b) ein nachweisbarer Mittelspannungseinfluss lassen sich für keinen der beiden Probenotypen feststellen. Letzteres ist bei Schweißverbindungen im Zusammenhang mit den vorliegenden Eigenspannungen zu betrachten. Ergänzend zu den experimentellen Schwingfestigkeitsuntersuchungen unter konstanten Lastamplituden wurden Versuchsreihen mit Überlasten und unter variablen Lastamplituden durchgeführt und statistisch ausgewertet.

Abschließend kann festgehalten werden, dass durch die beiden entwickelten Bewertungsverfahren auf Basis des Struktur- und Kerbspannungskonzepts die Schwingfestigkeit von geschweißten Bolzen- und Mutterverbindungen ausreichend gut abgeschätzt werden kann. Diese weisen Streuungen von $T_S = 1:2.0$ (Strukturspannungsansatz) und $T_S = 1:2.3$ (Kerbspannungsansatz) leicht über dem typischen Bereich für Schweißverbindungen auf, die jedoch durch den zusätzlichen Einfluss der Montagevorspannung erklärt werden kann. Bei der Berücksichtigung der Montagevorspannung stellt die Korrelation mit dem sich lokal einstellenden, versagensrelevanten Beanspruchungszustand weiterhin eine Herausforderung für die Bewertung dar. Dennoch konnten aus den Ergebnissen Empfehlungen für eine Lebensdauerbewertung abgeleitet werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Berichtsumfang:	83 S., 64 Abb., 6 Tab., Anhang A und B
Beginn der Arbeiten:	01.10.2019
Ende der Arbeiten:	31.03.2023
Zuschussgeber:	BMW i / IGF-Nr. 20818 N
Forschungsstelle 1:	Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF Leiter: Prof. Dr.-Ing. T. Melz
Forschungsstelle 2:	Technische Universität Darmstadt, Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik Fachgebiet Werkstoffmechanik, IFSW Leiter: Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald
Bearbeiter und Verfasser:	A. Jöckel (LBF) B. Möller (LBF) H. T. Beier (IFSW) P. Yadegari (IFSW)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Stand der Wissenschaft und Technik	3
1.2	Ziel des Forschungsvorhabens	7
2	Grundlegende Informationen über die verwendeten Proben	8
2.1	Bolzenproben.....	9
2.2	Mutterproben.....	12
2.3	Versuchsreihenübersicht und -bezeichnungen.....	14
3	Schwingfestigkeitsuntersuchungen	17
3.1	Versuchsbeschreibung.....	17
3.1.1	Versuchsprinzip und -aufbau	17
3.1.2	Ermittlung der Vorspannkräfte	21
3.2	Versagenskriterien und -verhalten.....	25
3.2.1	Versagenskriterium „Bruch“	25
3.2.2	Versagenskriterium „Anriss“	27
3.3	Versuchsergebnisse.....	29
3.3.1	Axialzugbelastung ohne Vorspannung.....	29
3.3.2	Schrägzugbelastung	30
3.3.3	Mutterverbund mit Schrägzugbelastung.....	33
3.3.4	Zusammenfassung	47
4	Finite Element Modelle (FE-Modelle), Strukturspannung	47
4.1	Bolzen- und Mutterverbindungen, Axialbelastung.....	47
4.2	Bolzen- und Mutterverbindungen, Schrägzugbelastung	48
4.3	Ermittlung der Strukturspannung (post-processing).....	49
5	Schwingfestigkeitsbewertung, Strukturspannung	50
5.1	Ohne Mittelung der Neigung einzelner Versuchsreihen.....	51
5.2	Mit Mittelung der Neigung einzelner Versuchsreihen.....	55
6	Schwingfestigkeitsbewertung, Kerbspannungskonzept	59
6.1	Finite-Elemente-Modelle	59
6.1.1	Bolzenprobe und -verbund.....	60
6.1.2	Mutterprobe und -verbund	61

6.2	Schwingfestigkeitsbewertung	63
7	Diskussion	66
8	Schlussfolgerung und Ausblick	67
8.1	Vorbereitung für Validierung mittels Bauteilähnlicher Napfprobe (Strukturspannungskonzept)	69
9	Ergänzungen zum Abschlussbericht	72
9.1	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	72
9.1.1	Verwendung der Zuwendung	72
9.2	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	72
9.3	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen	73
9.4	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	74
9.5	Geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	75
9.6	Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens	76

Anhang

Anhang A – Schwingfestigkeitsergebnisse Bolzenproben

Anhang B – Schwingfestigkeitsergebnisse Mutterproben

Förderhinweis und Danksagung

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis eines Forschungsprojekts, das von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. - FAT über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurde.

Die Bearbeitung erfolgte am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF unter der Leitung von Herrn Professor Dr.-Ing. Tobias Melz und am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik Fachgebiet Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald.

Den Teilnehmern des begleitenden Projektausschusses sei in besonderer Form gedankt. Insbesondere gilt der Dank der Firma BMW Group für die Bereitstellung der Bleche sowie der Durchführung von CT-Scans, der Firma Tucker GmbH für die Bereitstellung und Schweißung der Gewindebolzenproben, der Firma Fastenrath für die Bereitstellung der Schweißmuttern und die Beratung/ Beurteilung der Mutterschweißproben, und der Firma ISIB Institut für Schweißtechnik und Ingenieurbüro Dr. Möll GmbH für die Anfertigung und Beurteilung von Schliffen geschweißter Verbindungselemente, der Firma Opel Automotive GmbH für die Durchführung von Simulationen und Vergleichsrechnungen, der Firma Ford-Werke GmbH für die Modellerstellung und die Durchführung von Beispielrechnungen an Baugruppen und der Firma IAMT Engineering GmbH & Co. KG für die Durchführung vom Vergleichsberechnungen zur Schwingfestigkeit von geschweißten Verbindungselementen.

1 Einleitung

1.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Geschweißte Verbindungselemente wie Bolzen und Muttern werden in vielen technischen Anwendungen und Konstruktionen eingesetzt, z. B. im Automobilbau zur Befestigung von Aggregaten oder Fahrwerksteilen. Der zunehmende Einsatz von strukturelevanten und zyklisch belasteten Verbindungselementen, sowie der verstärkte Einsatz hochfester Werkstoffe zur Erschließung weiterer Leichtbaupotenziale stellt Produktentwickler kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) sowie nicht-KMU vor zunehmende Herausforderungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass keine Lebensdauerbewertungen für geschweißte Verbindungselemente aus Stahl vorliegen, (Ausnahme: Schweißkopfbolzendübel im Stahlbau, siehe [1]). Die Schwingfestigkeit ist jedoch ein entscheidendes Auslegungskriterium für die genannten Verbindungselemente und bedarf daher besonderer

Aufmerksamkeit [2]. Durch den späteren Montageprozess solcher Verbindungselemente können in den Schweißbereichen hohe Eigenspannungen vorliegen, die einerseits die Schwingfestigkeit reduzieren (bei Zugvorspannung) bzw. erhöhen (bei Druckvorspannung) können. Diesen Einfluss gilt es zu berücksichtigen.

Für die Ausführung und Charakterisierung des Nahtbereiches von geschweißten Verbindungselementen gelten Randbedingungen und Regelungen (z. B. Schweißprozess, Stromstärke, Schweißdauer usw.) wie für andere Schweißungen auch. Eine gute Übersicht über die einzelnen Fertigungsparameter mit Fokus auf geschweißte Bolzen findet man in [3]. Soweit geeignete Fertigungsparameter und eine geeignete Nahtvorbereitung eingehalten werden, kann mit einer reproduzierbaren Nahtqualität und in der Folge auch mit gleichbleibenden Festigkeitskennwerten gerechnet werden.

Für die Schwingfestigkeitsbewertung von geschweißten Strukturen steht eine Vielzahl von Bewertungskonzepten zur Verfügung. Diese lassen sich in linear-elastische (spannungsbasierte) Konzepte (Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept sowie Strukturdehnungskonzept), elastisch-plastische Konzepte (Dehnungskonzept) und bruchmechanisch basierte Konzepte aufteilen [4]. Im industriellen Umfeld werden für eine Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen überwiegend das Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept verwendet. Diese auf dem Ansatz linear-elastischen Werkstoffverhaltens basierenden Konzepte sind z. B. in den IIW-Empfehlungen [5] enthalten. Das Nennspannungskonzept ist oftmals das Konzept mit dem geringsten Aufwand. Voraussetzung ist allerdings die Definition einer Nennspannung am versagensrelevanten Querschnitt, welches bei komplexen Bauteilen nur selten der Fall ist. Beim Strukturspannungskonzept wird dagegen eine Strukturspannung als Bewertungsgröße verwendet, die den Einfluss der Geometrie erfasst. Als Strukturspannung bei linienförmigen Schweißnähten wird entweder die in einem definierten Abstand von der Nahtübergangskerbe ermittelte Oberflächenspannung [6] oder die an den versagenskritischen Schweißnahtübergang extrapolierte Spannung, die sogenannte „Hot-Spot-Spannung“ definiert. Letztere wird für das Strukturspannungskonzept in [5] verwendet. Alternativ zur rechnerischen Ermittlung der Hot-Spot-Strukturspannung kann eine Strukturspannung auch durch Innenlinearisierung der berechneten Spannungsverteilung über der Blechdicke ermittelt werden [7]. Für Schweißverbindungen mit geringen Abmessungen, wie z. B. bei Schweißpunkten, erfolgt die Schwingfestigkeitsbewertung auf Basis von Schnittkräften oder Richtungsspannungen. Als Beispiel für die Bewertung kann das FESPOW-Konzept [8] genannt werden, das sich mittlerweile als Standard zur Bewertung von Schweißpunkten etabliert hat. Durch die explizite Erfassung des Geometrieinflusses wird einerseits eine im Vergleich zum Nennspannungskonzept drastische Reduzierung der Anzahl von Wöhlerlinien erzielt und andererseits der

Anwendungsbereich erweitert. Lokale Einflüsse aus der Nahtgeometrie können mit dem Strukturspannungskonzept definitionsgemäß jedoch nicht erfasst werden. Soweit solche Einflüsse schweißnahttypisch wiederkehrend auftreten, sind sie integral mit der zugehörigen Strukturspannungs-Wöhlerlinie erfasst. Im Falle des Kerbspannungskonzepts wird die Detailgestalt einer Schweißnaht direkt in die Schwingfestigkeitsbewertung einbezogen. Hierfür wird nach dem Referenzradiuskonzept der an den Nahtübergangs- oder -wurzelkerben tatsächlich vorliegende Radius durch einen definierten Referenzradius r_{ref} ersetzt. Die an den auf diese Weise abgebildeten Kerben berechnete Spannung kann direkt als Beanspruchungskennwert für eine Schwingfestigkeitsbewertung verwendet werden. Der in [9] vorgeschlagene Ersatzradius von $r_{\text{ref}} = 1.0 \text{ mm}$ für Grobbleche basiert auf empirischen Untersuchungen und deckt sich mit einem Vorschlag in [10], der einen fiktiven Ersatzradius von $r_{\text{ref}} = 1.0 \text{ mm}$ auf Basis der Hypothese der Mikrostützwirkung nach Neuber [11] abgeleitet hat. Für die Bewertung von punktgeschweißten Feinblechverbindungen wurde von Zhang und Richter [12] der Referenzradius $r_{\text{ref}} = 0.05 \text{ mm}$ erfolgreich angewandt und lässt sich auch durch bruchmechanische Betrachtungen begründen [13]. In [14] wurde eine Referenz-Wöhlerlinie für den Referenzradius $r_{\text{ref}} = 0.05 \text{ mm}$ für Liniennähte an Feinblechen abgeleitet. Bei komplexer Geometrie kann die Kerbspannung mit Hilfe von numerischen Verfahren, z. B. der Finite-Elemente-Methode (FEM), berechnet werden. Als Beanspruchungshypothese kann wahlweise die 1. Hauptspannung σ_1 , zu finden in [5] und [15], oder die Vergleichsspannung nach von Mises σ_{vM} [15] verwendet werden. Die berechneten Kerbspannungen werden anschließend zulässigen Kerbspannungen aus Richtlinien, wie z. B. der IIW-Richtlinie [5], gegenübergestellt.

In den Forschungsvorhaben [16] und [17] zeigte sich, dass an Schweißverbindungen aus Aluminium und Stahl das Versagen teilweise an Stellen auftrat, die nach dem Kerbspannungskonzept mit dem Referenzradius $r_{\text{ref}} = 0.05 \text{ mm}$ nicht als versagenskritisch bewertet wurden. In [18] und [19] wurde daher auf Grundlage des Spannungsmittelungsansatzes [11] bzw. des Spannungsabstandsansatzes, zu finden in [20] und [21], ein verbessertes Bewertungskonzept entwickelt, welches den versagenskritischen Bereich zuverlässiger erfassen bzw. identifizieren kann und das sowohl zur Bewertung von Grobblech- als auch Feinblechverbindungen geeignet ist. Mit Hilfe der sog. Effektivspannung [22], die über den Spannungsabstandsansatz im Sinne einer Punktspannung im kritischen Abstand oder über eine Ersatzstrukturlänge gebildet wird, konnte eine einheitliche Bewertung der Versagensorte erreicht werden.

Unter industriellen Bedingungen ist ein Strukturspannungsansatz mit möglichst geringer Elementanzahl zu bevorzugen, da die benötigte Elementanzahl bei der Anwendung des

Kerbspannungskonzepts mit einem Referenzradius $r_{\text{ref}} = 0.05 \text{ mm}$, z. B. im Falle einer Karosseriesimulation in der Automobilindustrie, erheblich zunimmt und somit zu hohen Rechenzeiten führt. Vor diesem Hintergrund sind der Aufwand inkl. Rechenzeiten und die Abschätzungsgüte der verwendeten Konzeptvarianten gegeneinander abzuwägen.

Die Schwingfestigkeit von Schweißbolzen war Fokus einiger Untersuchungen in der Literatur. In [23] wurde der Einfluss von aufgeschweißten Bolzen auf die Festigkeit von Hollandprofilen untersucht. Hierbei wurde eine Bewertung auf Basis des Kerbspannungskonzepts mit $r_{\text{ref}} = 1.0 \text{ mm}$ und des Spannungsmittelungsansatzes nach Neuber [11] betrachtet. Es ergaben sich Übereinstimmungen mit den Kennwerten von konventionellen Schweißverbindungen. Eine vergleichbare Untersuchung wurde auch in [24] durchgeführt. Hierbei wurde der Radius $r_{\text{ref}} = 0.05 \text{ mm}$ betrachtet. Es ergaben sich aus der Bewertung teils nicht-konservative Ergebnisse, die durch die Schweißnahtqualität begründet werden konnten. Die Schwingfestigkeit von Schweißmuttern wurde in [25] und [2] experimentell untersucht. In [25] stand der Vergleich zu konkurrierenden Fügeverfahren, den Clinch-Verbindungen, im Vordergrund. In [2] wurden insgesamt 21 Verbindungsvarianten mit unterschiedlichen Muttern, Blechdicken, und Stählen unterschiedlicher Festigkeit untersucht. Es wurde ein analytisches Modell zur Beschreibung der Schwingfestigkeit aufgestellt, das jedoch nur eine erfolgreiche Bewertung von jeweils Teilmengen der betrachteten Varianten ermöglichte. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Konfigurationen ist somit nicht gewährleistet. In den genannten Untersuchungen wurde jedoch nicht der Einfluss einer Montagevorspannung sowie der Einfluss von hochfesten Werkstoffen betrachtet. Die montagebedingten Mittelspannungen überlagern sich mit den aus dem Schweißprozess entstehenden Schweißeigenstressungen. Bei Schweißverbindungen im Schweißzustand wird sehr häufig die Annahme getroffen, dass diese hohe Zugeigenstressungen aufweisen. Aus diesem Grund werden in den Regelwerken üblicherweise Kennwerte für den Fall hoher Zugeigenstressungen, also unabhängig von der tatsächlich vorliegenden Eigenstressung, empfohlen, vgl. [5], [26], [27], [1] und [28]. Im Fall von Bolzenschweißverbindungen, die aus der Montage zusätzliche Zugvorbeanspruchungen erfahren, erscheint diese Annahme zunächst gerechtfertigt. Bei Schweißmuttern, die eine Druckvorbeanspruchung während der Montage aufgeprägt bekommen, ist die Annahme problematisch. In beiden Fällen überlagern sich die Eigenstressungsfelder aus dem Schweiß- und dem Montageprozess. Hinzu kommen die Lastmittelspannungen aus zyklischer Beanspruchung, die zu einem Abbau der Montagevorspannung und zu einer Umlagerung der Eigenstressungen führen können. Aussagen über den verbleibenden Eigenstressungszustand und dessen Auswirkungen auf die Schwingfestigkeit können nicht getroffen werden. Entsprechende Untersuchungen sind in der Literatur nicht bekannt.

Allgemein ist aus der Literatur, z. B. in [29], [30] und [16], bekannt, dass durch den Einsatz höherfester oder hochfester Stähle für geschweißte Verbindungen keine höhere Schwingfestigkeit erreicht werden kann. Die höhere Grundfestigkeit wird durch eine erhöhte Kerbempfindlichkeit relativiert, so dass die Schwingfestigkeit praktisch unabhängig von der Stahlfestigkeit bleibt. Die spezifische Kerbempfindlichkeit des Werkstoffs ist daher die maßgebliche Kenngröße für die Schwingfestigkeit. Systematische Untersuchungen an Schweißverbindungen aus hochfesten Stählen mit Verbindungselementen hinsichtlich der Schwingfestigkeit sind nicht bekannt.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Bisher liegen keine validen Daten und Berechnungskonzepte vor, mit denen die Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungselemente in lasttragenden Verbindungen sicher ermittelt werden kann. Der Einfluss von Montagevorspannungen sowie hochfester Stähle auf die Schwingfestigkeit solcher Verbindungen ist ungeklärt. Entsprechende Verbindungen werden aktuell vor allem experimentell abgesichert. Um KMU die Möglichkeit des Einsatzes geschweißter Verbindungsmittel zu ermöglichen, ist es wünschenswert, entsprechend validierte Berechnungsmethoden zu erarbeiten und zur Verfügung zu stellen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Ableitung, Entwicklung und Validierung von geeigneten Bemessungskonzepten zum rechnerischen Nachweis zyklisch beanspruchter, geschweißter Verbindungselemente. In die Lebensdauerbewertung sollen alle relevanten Verbindungscharakteristika wie Struktur- und Nahtgeometrie, Einfluss von hochfesten Stählen auf die Schwingfestigkeit und Auswirkungen von Schweißeigenstressungen zusammen mit Montagevorspannungen und deren Abbau infolge zyklischer Beanspruchung eingehen.

Grundlegende Annahme für die durchgeführten Untersuchungen lag in der Anwendbarkeit eines Strukturspannungskonzepts zur Bewertung von geschweißten Verbindungselementen unter zyklischer Beanspruchung. Hinsichtlich der vorgenannten Punkte sind dabei der spannungsmechanische und statistische Größeneinfluss zu berücksichtigen. Zudem muss die lokal vorliegende Mittelspannung aus den Schweiß- und Montageprozessen berücksichtigt werden. Dies kann für einen zu ermittelnden stabilisierten Zustand der Mittelspannungen z. B. über die Mittelspannungsempfindlichkeit M erfolgen.

Um die Einflussgrößen getrennt voneinander erfassen und schlussendlich auch bewerten zu können, wurden im Rahmen der experimentellen und analytischen Untersuchungen auch Anschweißteile ohne Vorspannung betrachtet. Ziel ist es hierdurch, den Einfluss der Geometrie der Verbindung mit ihren geringen Schweißnahtabmessungen bei Einsatz

sowohl üblicher Stähle als auch hochfester Stähle experimentell identifizieren zu können. Diese Untersuchungen dienen der Ableitung bzw. Kalibrierung der Bemessungskonzepte. Darauf aufbauend soll der Einfluss der Montagevorspannung und deren zeitliche Entwicklung untersucht werden. Hierzu werden Situationen an Schweißproben mit den Verbindungselementen Gewindebolzen und Schweißmuttern bei konstanten Mittellasten sowie unter Berücksichtigung von Montagevorspannungen und deren Abbau experimentell und rechnerisch betrachtet.

Ziel ist schlussendlich die Erstellung von linear-elastisch basierten Bemessungskonzepten, Struktur- und Kerbspannungskonzepten, so dass auch KMU mit möglichst geringem Eigenforschungs- und Berechnungsaufwand eine zuverlässige Abschätzung der Schwingfestigkeit erzielen können.

2 Grundlegende Informationen über die verwendeten Proben

Die Schwingfestigkeitsversuche wurden an zwei unterschiedlichen Probentypen, an Bolzenproben und an Mutterproben durchgeführt, Abbildung 1. Die Verbindungselemente wurden auf Bleche mit variierenden Blechdicken t und verwendeten Werkstoffen geschweißt. Die Abmessung der Bleche beträgt jeweils 150 mm x 150 mm. In Tabelle 1 sind die Blechvariationen aufgetragen.

Tabelle 1: Verwendete Blechvariationen

Bezeichnung	Material	R_m in MPa	$R_{p0,2}$ in MPa	Blechdicke t in mm
210-08	CR210BH-GI50/50-U	320 – 400	210 – 270	0,8 mm
210-16	CR210BH-GI50/50-U	320 – 400	210 – 270	1,6 mm
700-16	CR700Y980T-DP-EG50/50-U	980 – 1130	700 – 850	1,6 mm

CR: „Cold-Rolled“; BH: „Bake-Hardening“; DP: „Dual-Phase steel“; Y: Mindestzugfestigkeit; T: Längsrichtung; GI: Verzinkung (Feuerverzinkung); EG: „Electrolytic galvanizing“; U: Kaltverformte Bleche

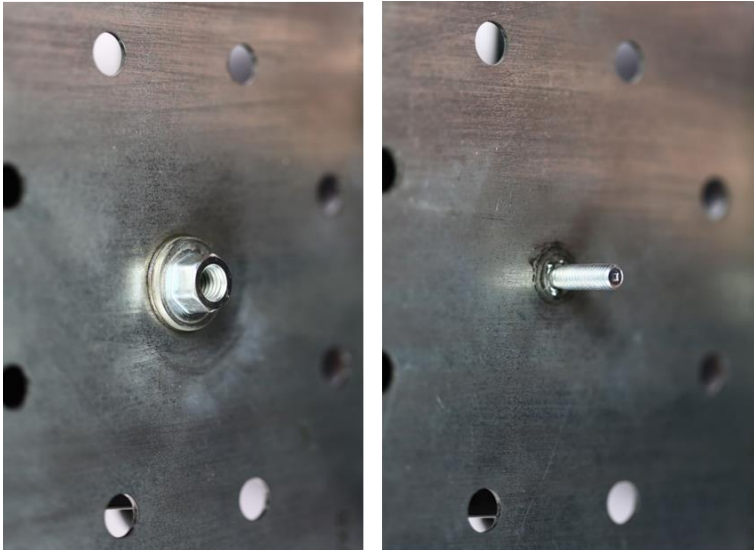


Abbildung 1: Mutterproben (links) und Bolzenproben

2.1 Bolzenproben

Zur Fertigung der Bolzenproben wurden mit Lichtbogenbolzenschweißverfahren nach dem Hubzündungsprinzip ohne Keramikring und ohne Schutzgas 20 mm lange M6 Gewindebolzen der Festigkeitsklasse 8.8 (SWB130.10 SM6x20.8.8) auf die vorgefertigten Bleche geschweißt. Die Schweißnähte sind in der Außenkontur sehr unregelmäßig, Abbildung 2. Zur Verdeutlichung ist für 210-08 zusätzlich die CT-Aufnahme dargestellt.

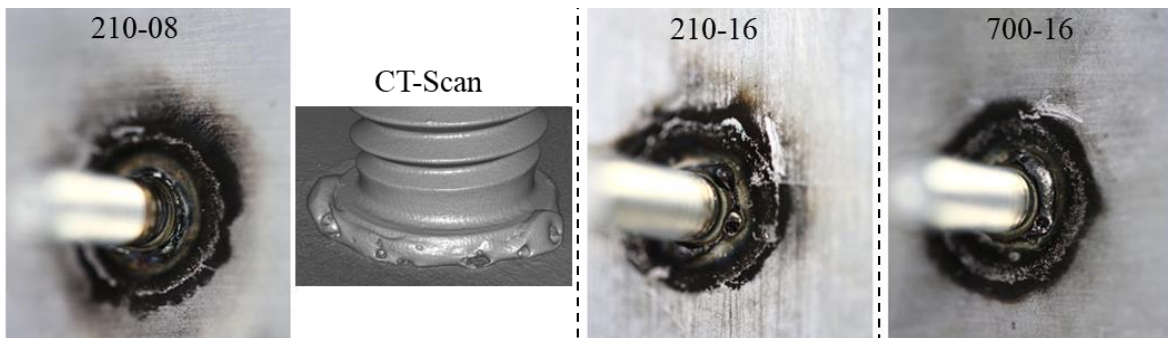


Abbildung 2: Typische Schweißnähte der Bolzenverbindungen

Zur näheren Untersuchung und Charakterisierung der Bolzenproben wurden Querschliffe an den drei Varianten der Bolzenproben durchgeführt, Abbildung 3. Dabei wurden teilweise Lufteinschlüsse in den Schmelzzonen vorgefunden, welche jedoch überwiegend in der Mitte vorgekommen sind. Trotz der Einschlüsse wurde die Schweißqualität als zufriedenstellend eingestuft.

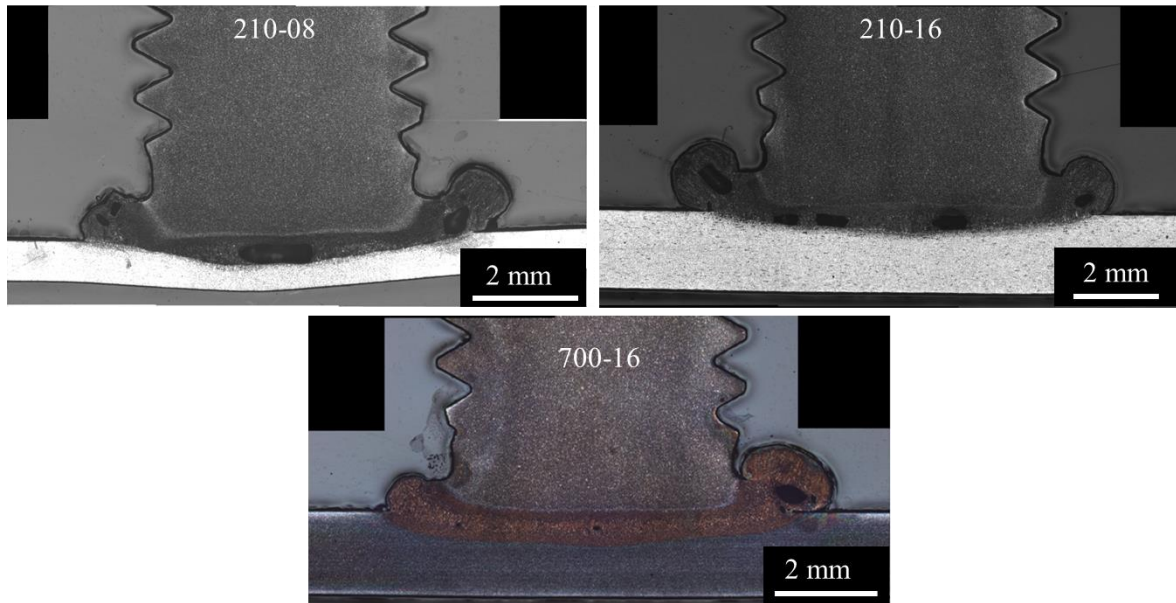


Abbildung 3: Local geometry of the seam weld of the bolt specimens

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Gefügeuntersuchungen an der Bolzenprobe 210-08. Im Übergangsbereich vom Blech zur Schweißnaht-Schmelzzone, 1, sind leichte Umkörnungen im ferritischen Bereich sowie ein Übergang zu grobem, nadeligem Martensit zu erkennen. Im Blech unterhalb der Schweißnaht, 2, treten vermehrte feine Perlitbereiche an Korngrenzen der ferritischen Matrix auf. Im Anschluss des Bolzens, 3, findet der Übergang von feinem, durch den Wärmeeinfluss umgewandeltem martensitischem Gefüge zum Grundgefüge des Gewindebolzens statt. Die Schweißnaht-Schmelzzone, 4, weist groben, nadel- bis plattenförmigen Martensit auf. Eine vergleichbare Gefügestruktur ist für die Bolzenprobe 210-16 zu erkennen, Abbildung 5. Im Falle der Bolzenprobe mit dem hochfesten Blech 700-16 liegt im Blech unterhalb der Schweißnaht, 2, martensitisch-ferritisches DP Gefüge vor, Abbildung 6.

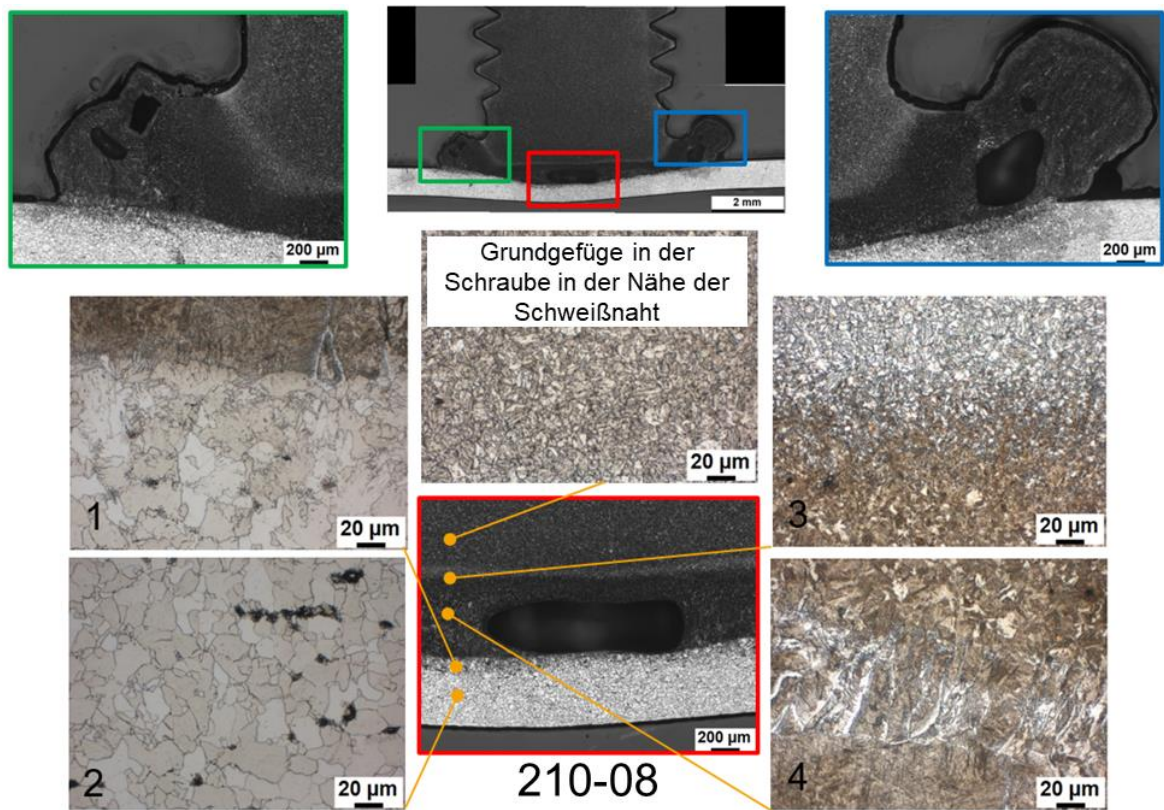


Abbildung 4: Mikrostruktur und lokale Geometrie der Schweißnaht der Bolzenprobe 210-08

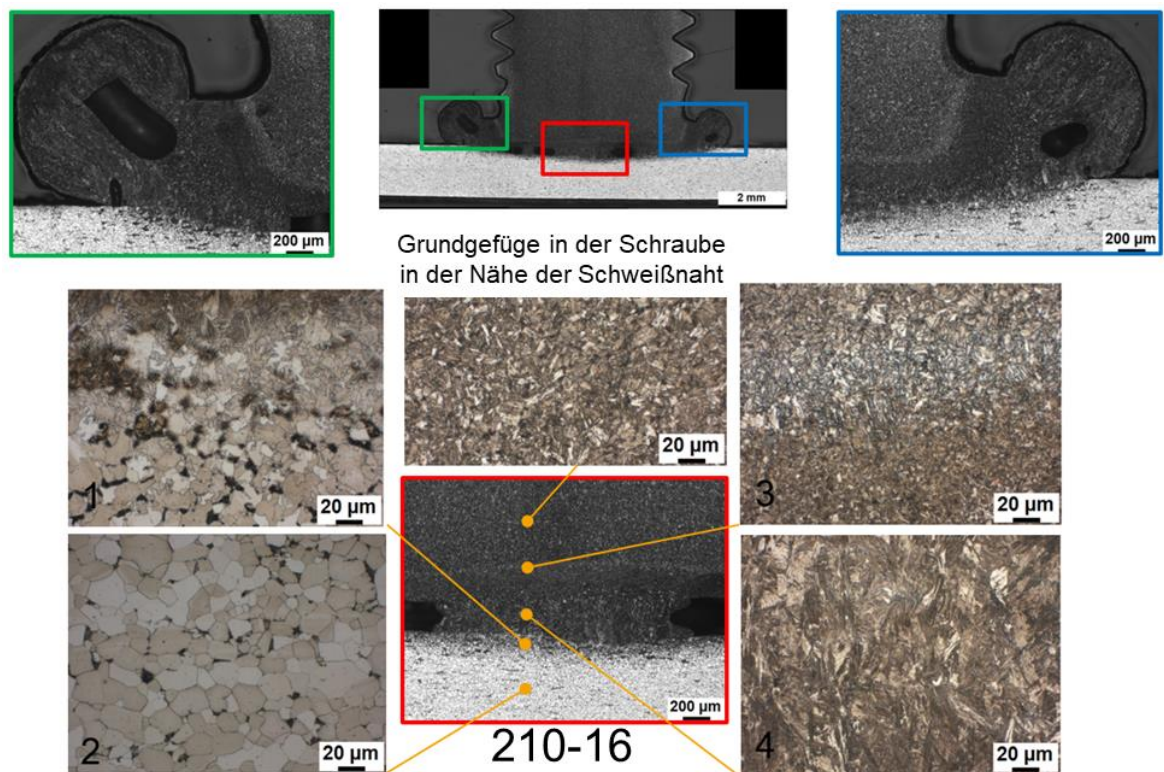


Abbildung 5: Mikrostruktur und lokale Geometrie der Schweißnaht der Bolzenprobe 210-16

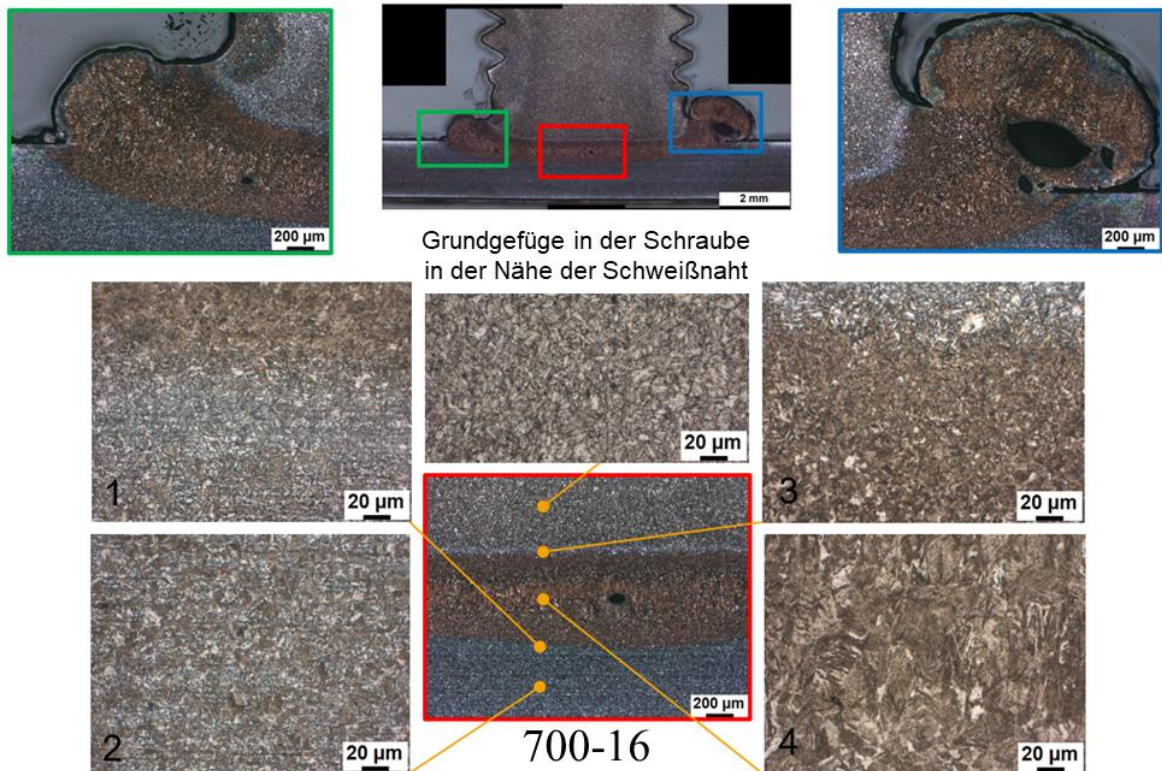


Abbildung 6: Mikrostruktur und lokale Geometrie der Schweißnaht der Bolzenprobe 700-16

2.2 Mutterproben

Für die Mutterproben wurden Muttern (Gewinde M8, Geometrie ähnlich DIN EN ISO 21670) mittels Widerstandsbuckelschweißverfahren auf die vorgefertigten Bleche geschweißt. Hierbei wurden kreisrunde Schweißnähte sowie Punktschweißungen mit drei Segmenten durchgeführt, Abbildung 7.



Abbildung 7: Typische Schweißnähte der Mutterverbindungen, links: kreisrund, rechts: drei Segmente.

Für die Varianten der Mutterverbindungen wurden stichprobenartig Schlibfbilder zur Bewertung der Schweißnaht und Analyse der lokalen Kerbgeometrie angefertigt. Dabei wurde jeweils eine zufriedenstellende Schweißqualität vorgefunden, die hinsichtlich der geometrischen Ungängen und der Gefügeverteilung den Bolzenproben entspricht.

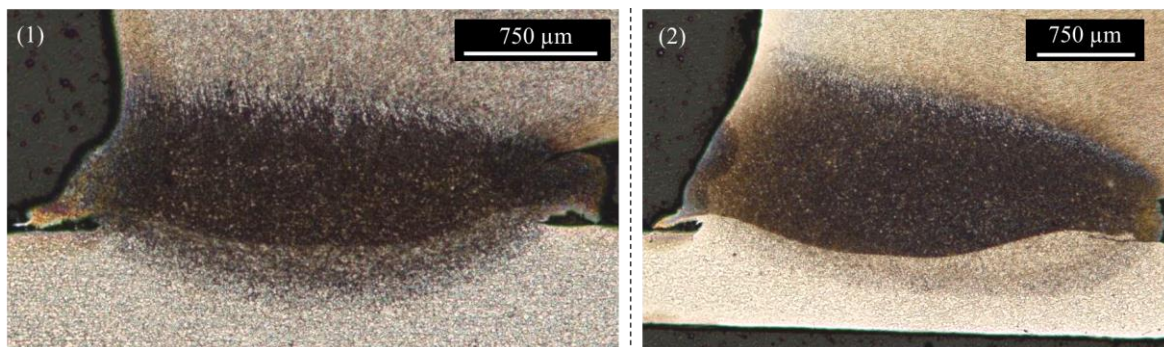


Abbildung 8: Lokale Geometrie der Schweißnaht der Mutterprobe, rund geschweißt 210-16 (1) und 3 Segmente geschweißt 210-08 (2)

2.3 Versuchsreihenübersicht und -bezeichnungen

Die Versuchsreihenbezeichnungen setzen sich aus den relevanten Proben- und Versuchsparametern zusammen, die im Versuchsprogramm variiert wurden. Die Langbezeichnungen der Versuchsreihen AA-111-22-33-BB-44-55(-C6)-DD setzen sich durch Trennstriche separierte Kürzel wie folgt zusammen:

1. AA: Probentyp
 - a. BO = Bolzenprobe
 - b. M3 = Mutterprobe, in 3 Segmenten geschweißt
 - c. MK = Mutterprobe, kreisrund geschweißt
2. 111: Blechwerkstoff
 - a. 210 = CR210BH-GI50/50-U
 - b. 700 = CR700Y980T-DP-EG50/50-U
3. 22: Blechdicke t [mm]
 - a. 08 = 0,8 mm
 - b. 16 = 1,6 mm
4. 33: Lastrichtung α [°]
 - a. 00 = 0° (Bolzen- und Lastachse axial ausgerichtet)
 - b. 45 = 45° (Bolzen- gegenüber Lastachse um 45° geneigt)
 - c. 90 = 90° (Bolzenachse orthogonal zu Lastachse)
5. BB: Belastungsart
 - a. CA = zyklische Belastung mit konstanten Lastamplituden
 - b. VA = zyklische Belastung mit variablen Lastamplituden
6. 44: Lastverhältnis R [-]
 - a. 01 = 0,1 (zugschwellend, Unterlast 10 % der Oberlast)
 - b. 05 = 0,5 (zugschwellend, Unterlast 50 % der Oberlast)
 - c. m1 = -1 (wechselnd, Unterlast = Oberlast)
7. 55: (a) Anzugsmoment M [Nm] bzw. (b) Vorspannkraft F_v [kN]
 - a. BO: 15 = 1,5 Nm | 20 = 2,0 | 35 = 3,5 | 40 = 4,0 | 50 = 5,0 | 80 = 8,0 Nm
 - b. M3/MK: 14 = 14 kN (F1) | 10 = 10 kN (F2)
8. C6: Position ggü. Lastachse, nur bei 3-segmentig geschweißten Mutterproben (M3)
 - a. P1 = 0° → 1 Segment (zentral) unter Biegezugbelastung
 - b. P2 = 180° → 2 Segmente (winklig) unter Biegezugbelastung
9. DD: Überlast zu Versuchsbeginn
 - a. ÜL = Überlast zu Versuchsbeginn

Hinweis: Im Forschungsbericht werden aus Gründen der Leserlichkeit und Nachvollziehbarkeit i. d. R. nicht die Langbezeichnungen, sondern aussagekräftige Kurzbezeichnungen der Versuchsreihen verwendet, vgl. bspw. Abbildung 22ff und Tabelle 4 (für Mutterproben).

Tabelle 2: Versuchsreihenübersicht der Bolzenproben

Langbezeichnung	Probentyp	Werkstoff	Blechdicke t [mm]	Lastrichtung α [°]	Belastungsart	Lastverhältnis R [-]	Anzugsmoment M [Nm]	Überlast
BO-210-08-00-CA-01	Bolzen	CR210	0,8	0 (axial)	CAL	0,1	-	-
BO-210-08-00-CA-05	Bolzen	CR210	0,8	0 (axial)	CAL	0,5	-	-
BO-210-16-00-CA-01	Bolzen	CR210	1,6	0 (axial)	CAL	0,1	-	-
BO-210-08-45-CA-01-20	Bolzen	CR210	0,8	45	CAL	0,1	2,0 (1,5)	-
BO-210-08-90-CA-01-20	Bolzen	CR210	0,8	90	CAL	0,1	2,0	-
BO-210-08-90-CA-01-20	Bolzen	CR210	0,8	90	CAL	0,1	1,5	-
BO-210-08-90-VA-01-20	Bolzen	CR210	0,8	90	VAL	0,1	2,0	-
BO-210-08-90-CA-05-20	Bolzen	CR210	0,8	90	CAL	0,5	2,0	-
BO-210-08-90-CA-m1-20	Bolzen	CR210	0,8	90	CAL	-1	2,0 (1,5)	-
BO-210-08-90-CA-01-20-ÜL	Bolzen	CR210	0,8	90	CAL	0,1	2,0	ja (ÜL)
BO-210-16-90-CA-01-35	Bolzen	CR210	1,6	90	CAL	0,1	3,5	-
BO-210-16-90-CA-01-50	Bolzen	CR210	1,6	90	CAL	0,1	5,0	-
BO-700-16-90-CA-01-40	Bolzen	CR700	1,6	90	CAL	0,1	4,0	-
BO-700-16-90-CA-01-80	Bolzen	CR700	1,6	90	CAL	0,1	8,0	-

Tabelle 3: Versuchsreihenübersicht der Mutterproben

Langbezeichnung	Probentyp	Werkstoff	Blechdicke t [mm]	Lastrichtung α [°]	Belastungsart	Lastverhältnis R [-]	Vorspannkraft F_V [kN]	Position ggü. Lastachse	Überlast
M3-210-16-00-CA-01-P1	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	0 (axial)	CAL	0,1	-	P1 (0°)	-
M3-210-16-00-CA-05-P1	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	0 (axial)	CAL	0,5	-	P1 (0°)	-
M3-210-16-00-CA-10-P1	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	0 (axial)	CAL	10	-	P1 (0°)	-
MK-210-16-00-CA-01	Mutter, kreisrund	CR210	1,6	0 (axial)	CAL	0,1	-	-	-
M3-700-16-00-CA-01-P1	Mutter, 3 Segm.	CR700	1,6	0 (axial)	CAL	0,1	-	P1 (0°)	-
M3-210-16-45-CA-01-P1-14	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	45	CAL	0,1	14 (F1)	P1 (0°)	-
M3-210-16-45-CA-01-P2-14	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	45	CAL	0,1	14 (F1)	P2 (180°)	-
MK-210-16-45-CA-01-14	Mutter, kreisrund	CR210	1,6	45	CAL	0,1	14 (F1)	-	-
M3-210-08-90-CA-01-P1-14	Mutter, 3 Segm.	CR210	0,8	90	CAL	0,1	14 (F1)	P1 (0°)	-
M3-210-08-90-CA-01-P2-14	Mutter, 3 Segm.	CR210	0,8	90	CAL	0,1	14 (F1)	P2 (180°)	-
MK-210-08-90-CA-01-14	Mutter, kreisrund	CR210	0,8	90	CAL	0,1	14 (F1)	-	-
M3-210-16-90-CA-01-P1-14	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	90	CAL	0,1	14 (F1)	P1 (0°)	-
M3-210-16-90-CA-01-P1-10	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	90	CAL	0,1	10 (F2)	P1 (0°)	-
M3-210-16-90-CA-01-P2-14	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	90	CAL	0,1	14 (F1)	P2 (180°)	-
M3-210-16-90-VA-01-P1-14	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	90	VAL	0,1	14 (F1)	P1 (0°)	-
M3-210-16-90-CA-05-P1-14	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	90	CAL	0,5	14 (F1)	P1 (0°)	-
M3-210-16-90-CA-01-P1-14-ÜL	Mutter, 3 Segm.	CR210	1,6	90	CAL	0,1	14 (F1)	P1 (0°)	ja (ÜL)
MK-210-16-90-CA-01-P1-14	Mutter, kreisrund	CR210	1,6	90	CAL	0,1	14 (F1)	P1 (0°)	-
M3-700-16-90-CA-01-P1-14	Mutter, 3 Segm.	CR700	1,6	90	CAL	0,1	14 (F1)	P1 (0°)	-

3 Schwingfestigkeitsuntersuchungen

3.1 Versuchsbeschreibung

3.1.1 Versuchsprinzip und -aufbau

Bei den untersuchten Bolzen- und Mutterproben wurden jeweils Schwingfestigkeitsversuche unter reiner Axialzugbelastung ohne Vorspannung und unter Schrägzugbelastung (mit 45° und 90° zur Mittelachse des Verbindungselements) mit Montagevorspannung durchgeführt, Abbildung 9. Bei den Mutterproben mit Dreipunktverschweißung wurden zusätzlich zwei verschiedene Positionen P1 und P2 eingestellt, sodass entweder 1 Segment (P1) oder 2 Segmente (P2) auf der Biegezugseite des Bleches zu liegen kommt.

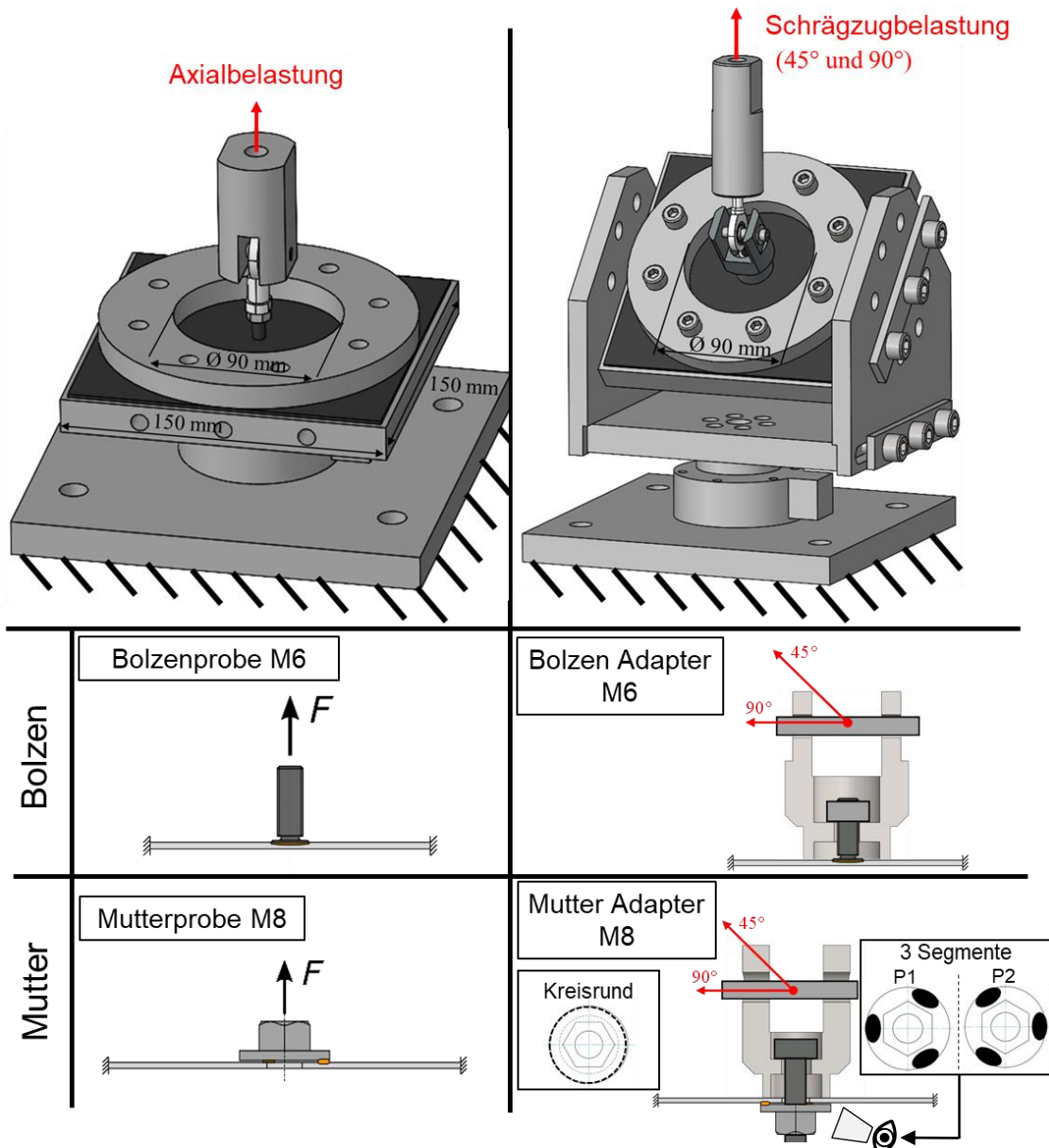


Abbildung 9: Schematischer Aufbau zur Einleitung für Axial-/Schrägzugbelastungen von Bolzen-/Mutterproben

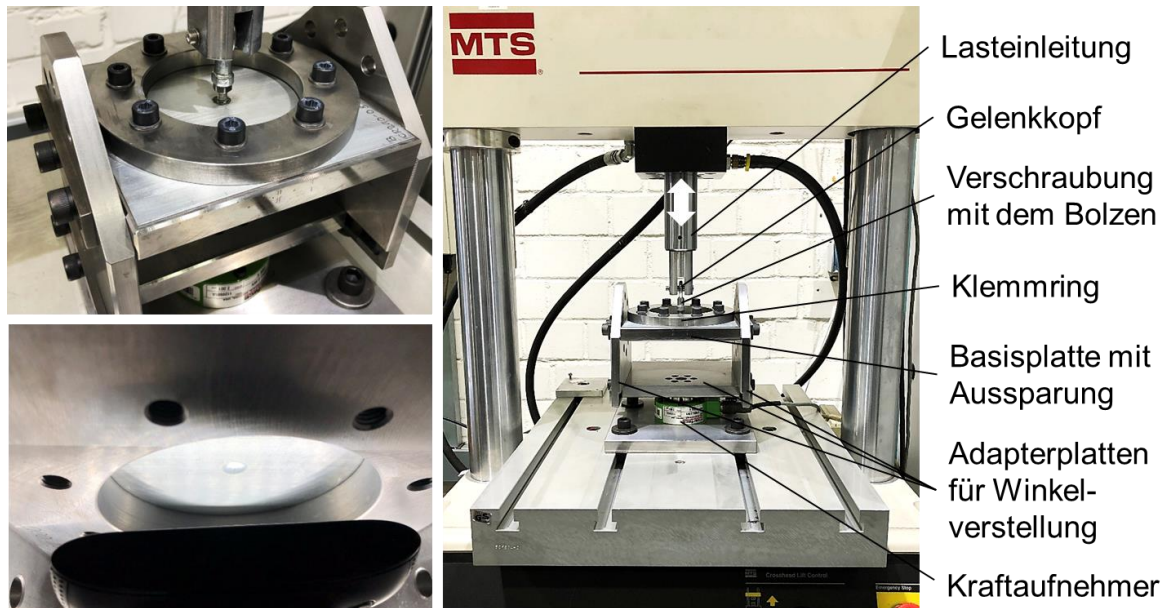


Abbildung 10: Versuchsaufbau für Bolzenproben unter Axialbelastung (0°)

Für die Versuche an den Bolzenproben (hier: Axialbelastung, Schrägzugbelastung über Modifikation des Aufbaus einstellbar) am LBF wurde ein uniaxialer, servohydraulischer Aufbau (25 kN-Maximallast, 2,5 kN Interfaceforce-Kraftaufnehmer) mit Regelelektronik (MTS 831.02) eingesetzt, um kraftgeregelt Belastungen über einen Gelenkkopf und Bolzenverschraubung im Schwingspielzahlbereich $5 \cdot 10^3 \leq N < 5 \cdot 10^6$ einzuleiten, Abbildung 10. Das Versagenskriterium „Bruch“ wurde über die Abschaltung des Versuchs bei einer Maximalwegzunahme von 3 mm definiert, für welches ein deutlicher Rissfortschritt ins Grundblech und ein deutliche Steifigkeitsabnahme (vgl. Kapitel 3.2) vorliegt. Die Prüffrequenz wurde in Abhängigkeit von den übrigen Versuchsparametern im Bereich $1,5 \text{ Hz} \leq f < 20 \text{ Hz}$ optimiert und versuchsspezifisch gewählt. Ein vergleichbarer uniaxialer, servohydraulischer Aufbau kam für die Versuche an den Mutterproben am IFSW zum Einsatz, Abbildung 11. Bei den Mutterproben ist das Versagenskriterium „Bruch“ für ein vergleichbares Schadensbild jedoch über die Abschaltung des Versuchs bei einer Verschiebung von 8 mm definiert. Die Versuche wurden bei einer Versuchsfrequenz von $f = 3 \text{ Hz}$ und bis zu einer Schwingspielzahl von $N = 2 \cdot 10^6$ durchgeführt. Versuche die das Versagenskriterium nicht überschritten haben, werden als Durchläufer gewertet.

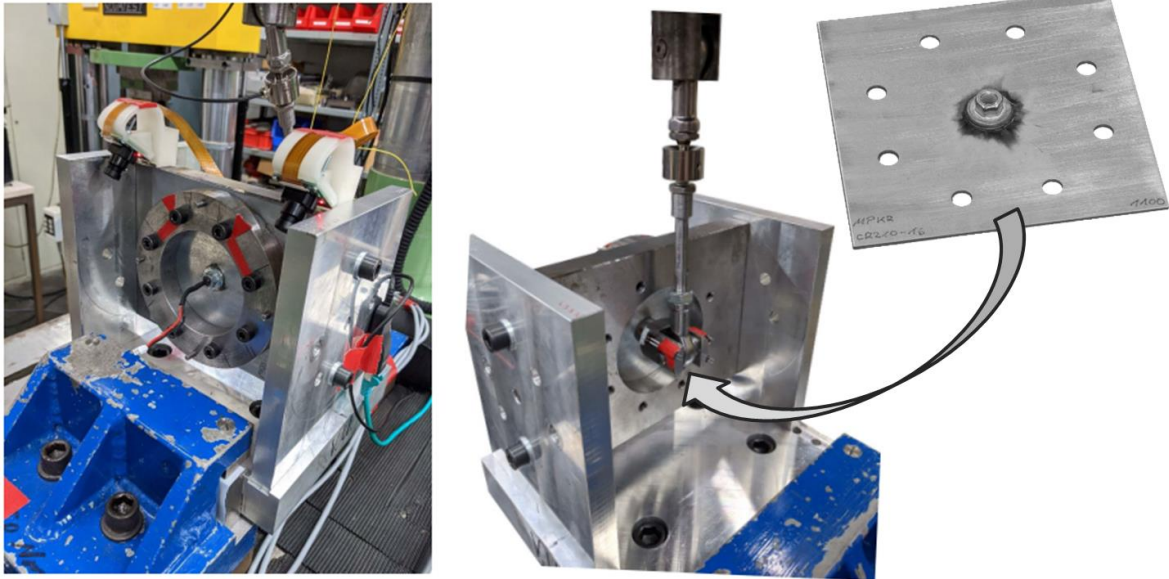


Abbildung 11: Versuchsaufbau für Mutterproben unter Schrägzugbelastung (90°)

Die Bleche mit aufgeschweißten Verbindungselementen wurden jeweils mittels einer Spanplatte mit Innendurchmesser von $d_i = 90 \text{ mm}$ fixiert. Im Falle der reinen Axialbelastung erfolgte die Lasteinleitung mit der Hilfe eines eingeschraubten Gelenkkopfs. Dagegen wurden zusätzliche Bolzen- und Mutteradapter verwendet, um mit der Hilfe eines mechanischen Drehmomentschlüssels (Bolzenproben: HAZET Drehmoment Prüfeinrichtung 6108-1CT mit 2,0 Nm bis 10,0 Nm Messbereich) definierte Drehmomente (Anzugsmomente) M bzw. Montagevorspannungen (Vorspannkräfte) F_V aufbringen zu können. Eingesetzte Adapter sind in Abbildung 12 bzw. Abbildung 13 (inkl. Abmessungen für Bolzen- und Mutterproben) dargestellt.

Im Falle der Bolzenproben 210-08 kam es zu sichtbaren Plastifizierungen (Napfbildung) des Bleches infolge eines Drehmoments von $M \geq 3 \text{ Nm}$, Abbildung 12. Um diese zu verhindern, wurden bei diesen Proben lediglich Drehmomente im Bereich von $1 \text{ Nm} \leq M < 3 \text{ Nm}$ verwendet. Diese liegen deutlich unterhalb des theoretisch vorgegebenen Drehmoments von $M = 8,8 \text{ Nm}$ und des maximal möglichen von $6 \text{ Nm} \leq M \leq 8 \text{ Nm}$. Drehmomente im letztgenannten Bereich führen für 0,8 mm dicke Bleche dazu, dass sich das Blech weiter napfförmig in die Adapteröffnung zieht, ohne dass höhere Drehmomente aufgebracht werden können. Höhere Drehmomente im Bereich von $3,5 \text{ Nm} \leq M \leq 5 \text{ Nm}$ (Bolzenproben 210-16) und $4 \text{ Nm} \leq M \leq 8 \text{ Nm}$ (Bolzenproben 700-16) wurden im Falle der erhöhten Blechdicke von 1,6 mm sowie in Kombination mit dem härtesten Stahlwerkstoff verwendet, die keine bis geringe Blechverformungen erzeugen. Anders als bei den Bolzenproben wird der Adapter bei den Mutterproben gegen den Flansch, der auf der gegenüberliegenden Seite angeschweißten Mutter verschraubt, Abbildung 9 rechts unten. Aus diesem Grund kann es nicht zu unerwünschten Plastifizierungen im Blech kommen.

Dadurch konnten Drehmomente im Bereich von $19 \text{ Nm} \leq M \leq 30 \text{ Nm}$ (Mutterproben: 210-08, 210-16 und 700-16) verwendet werden.

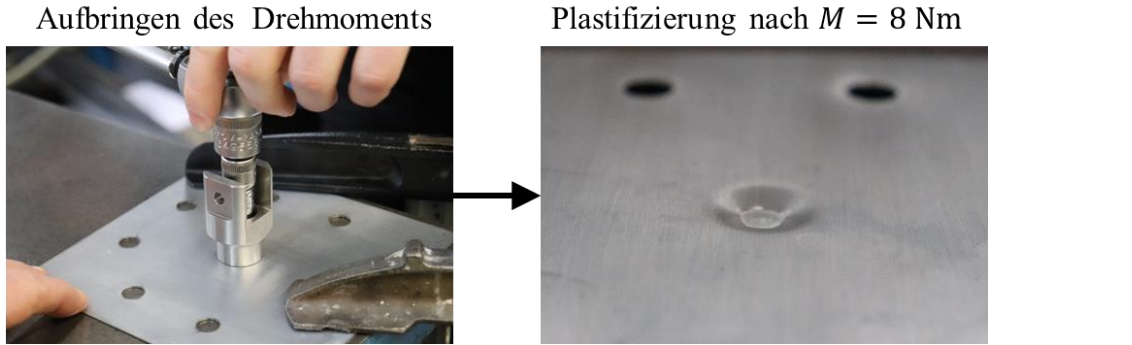


Abbildung 12: Napfbildung durch zu hohes Drehmoment bei der Montage im Falle der Bolzenproben (210-08)

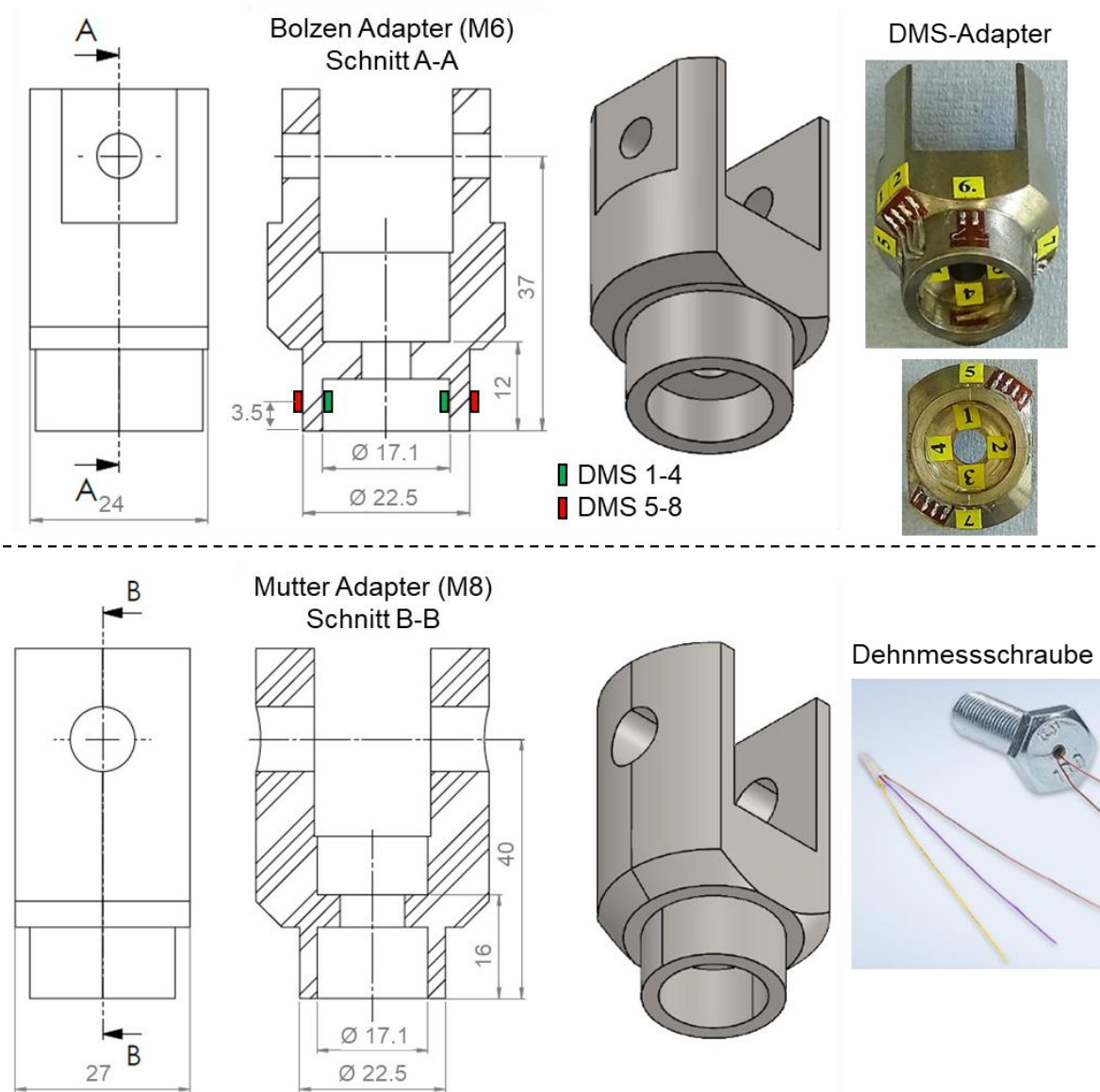


Abbildung 13: Verwendete Bolzen- und Mutteradapter

3.1.2 Ermittlung der Vorspannkkräfte

Für die Untersuchungen der Schweißbolzenproben wurde zusätzlich ein spezieller DMS-Adapter mit applizierten Dehnungsmessstreifen gefertigt, Abbildung 13. An der zylindrischen Innen- und Außenwand der Adapteroberfläche sind im Klemmbereich jeweils vier gleichmäßig verteilte Dehnungsmessstreifen (DMS) zur lokalen Dehnungsmessung angebracht, Abbildung 13. Anhand der Messsignale können Rückschlüsse auf die Beanspruchung und Belastung des Adapters und demnach auf die Vorspannkkräfte F_p gezogen werden. Die DMS sind durchnummeriert, wobei die inneren DMS die Nummern 1–4 und die äußeren DMS die Nummern 5–8 erhalten haben. Im Falle der Schweißmutterproben wurde eine modifizierte M8-Schraube mit innenliegenden Dehnungsmessstreifen zur Ermittlung der Vorspannkkräfte F_p verwendet, Abbildung 13.

Die Vorspannkkräfte F_p der Bolzenproben wurden mit Hilfe des DMS-Adapters ermittelt. Zuvor wurde eine Validierung des DMS-Adapters durchgeführt. Dazu wurde der Adapter mittels einer quasistatischen Prüfmaschine und einer Einspannvorrichtung belastet, wodurch die Nachgiebigkeit der Bolzenproben berücksichtigt werden konnten, Abbildung 14. Dabei wurden die resultierenden Dehnungen ε_{exp} bestimmt. Es wurden zwei modifizierte Bolzenproben hergestellt (210-16 und 210-08), wobei jeweils eine Gewindestange (M6) mit jeweils zwei Muttern (M6) mit den Blechen verschraubt bzw. verspannt wurde, um das Verformungsverhalten der geschweißten Bolzenproben möglichst realitätsnah abbilden zu können.

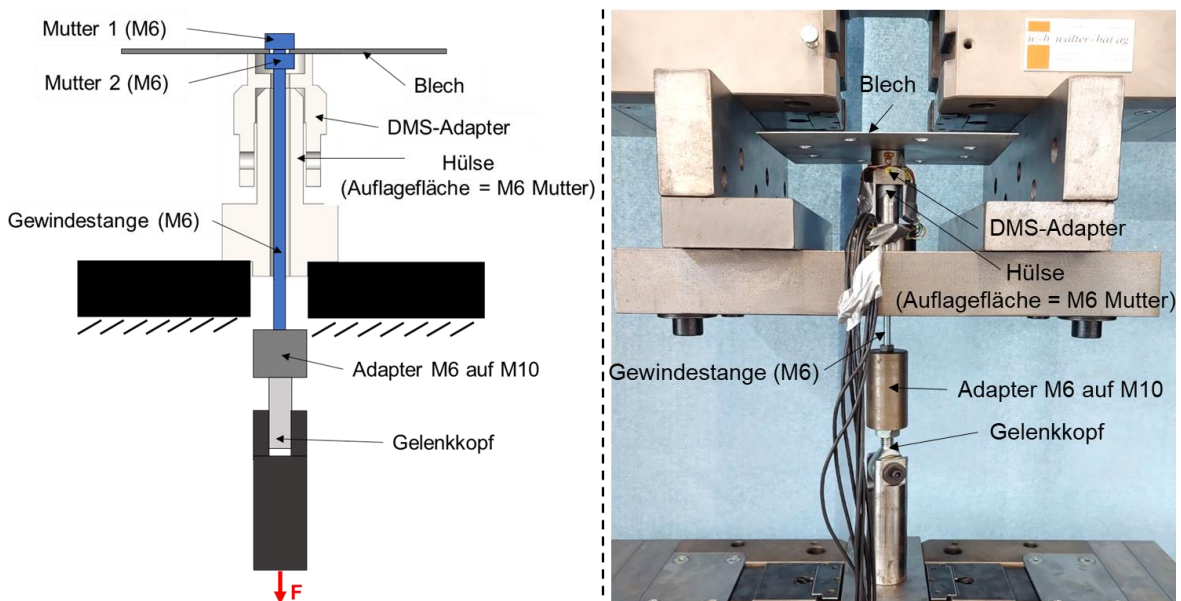


Abbildung 14: Einspannvorrichtung für Validierung des DMS-Adapters (Bolzenproben)

Mittels der in Kapitel 4 vorgestellten Simulationsmodelle (FE-Modelle) wurde ein Dehnungsabgleich zwischen experimentell gemessenen und simulierten Dehnungen

durchgeführt. Dabei ergibt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung, Abbildung 15. Der Zusammenhang zwischen Dehnung ε und Kraft F ergibt sich wie folgt:

$$\varepsilon = -0,074 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \cdot F \frac{1}{\text{N}} \quad (1)$$

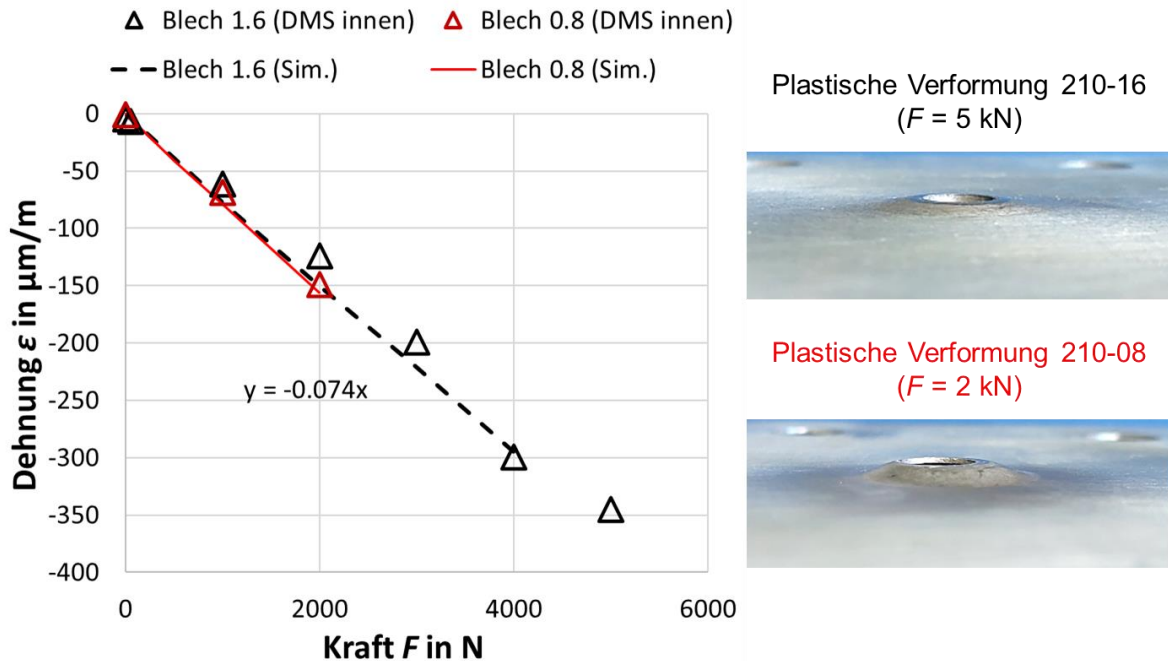


Abbildung 15: Dehnungsabgleich zwischen experimentell gemessenen und simulierten Dehnungen (Bolzenproben)

Zusätzlich wurde der DMS-Adapter gegen die geschweißten Bolzenproben geschraubt. Die definierten Anzugsmomente M wurden mittels mechanischen Drehmomentschlüssel aufgebracht und die resultierenden Dehnungen ε_{exp} auf der Innenseite des DMS-Adapters bestimmt und anschließend gemittelt, Abbildung 16. Im Falle der Proben 210-16, bei einem verwendeten Drehmoment von $M = 3,5 \text{ Nm}$, streuen die Messwerte, bezogen auf den Mittelwert von $\varepsilon = -118 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$, um bis zu 13 %. Ähnlich verhalten sich die Messwerte bei $M = 5 \text{ Nm}$. Eine auffällig hohe Streuung zeigen die Messwerte der Proben 700-16, welche mit einem Drehmoment von $M = 8 \text{ Nm}$ angezogen wurden. Bezogen auf den Mittelwert von $\varepsilon = -291 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ ergeben sich Abweichungen von bis zu 39 %. Der genaue Grund für die hohen Abweichungen konnten im Zuge der Untersuchungen nicht geklärt werden. Jedoch wird vermutet, dass Probeninperfektionen wie z. B. verformte Bleche, exzentrisch und schräg aufgeschweißte Bolzen in Kombination mit Reibeffekten, Messungengenauigkeiten und Abweichungen während des mechanischen Anzugsprozesses zu diesen hohen Streuungen geführt haben. Nichtsdestotrotz wurde eine lineare Regression anhand der einzelnen Messpunkte erstellt, Abbildung 16. Mit dieser ergibt sich der Zusammenhang zwischen Dehnung ε und Drehmoment M wie folgt:

$$\varepsilon = -34 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \cdot M \frac{1}{\text{Nm}} \quad (2)$$

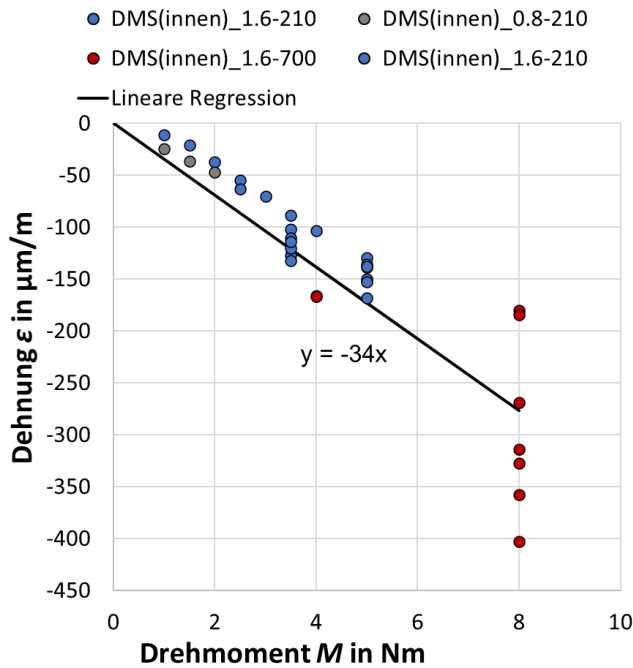


Abbildung 16: Exp. gemessenen und gemittelten Dehnungen mit Anzugsversuchen (Bolzenproben)

Mittels (1) und (2) lässt sich ein Zusammenhang zwischen Kraft F und Drehmoment M erstellen, Abbildung 17. Dieser wird wie folgt beschrieben:

$$M = 2,18 \cdot 10^{-3} \text{Nm} \cdot F \frac{1}{\text{N}} \quad (3)$$

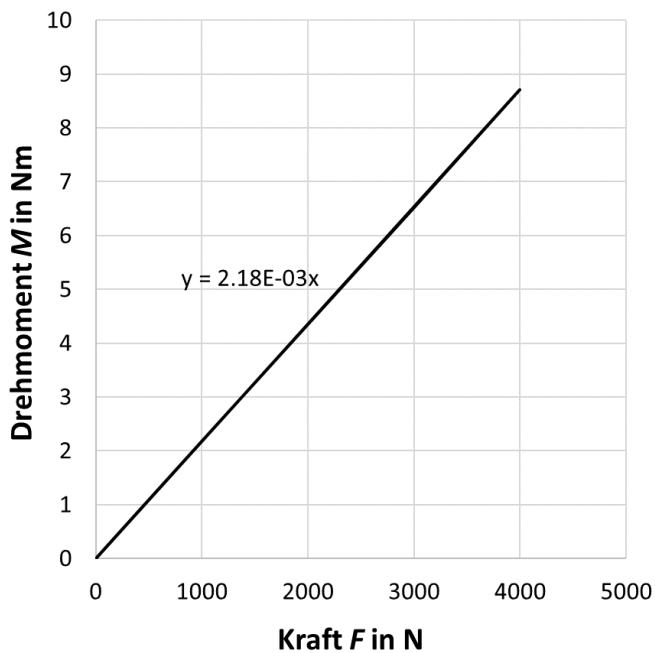


Abbildung 17: Korrelation zwischen Kraft und Drehmoment (Bolzenproben)

Aufgrund der hohen Streuung der exp. gemessenen Dehnungen ε_{exp} bei dem Anzugs- bzw. Montageprozess, wurden die vorliegenden Vorspannkraft F_p für die FE-Simulationen (Kapitel 4) mit Gleichung (1) bestimmt.

Im Falle der Mutterproben wurde die Vorspannkraft F_p zunächst mittels modifizierter M8-Schrauben mit innenliegenden Dehnungsmesstreifen ermittelt, Abbildung 18.

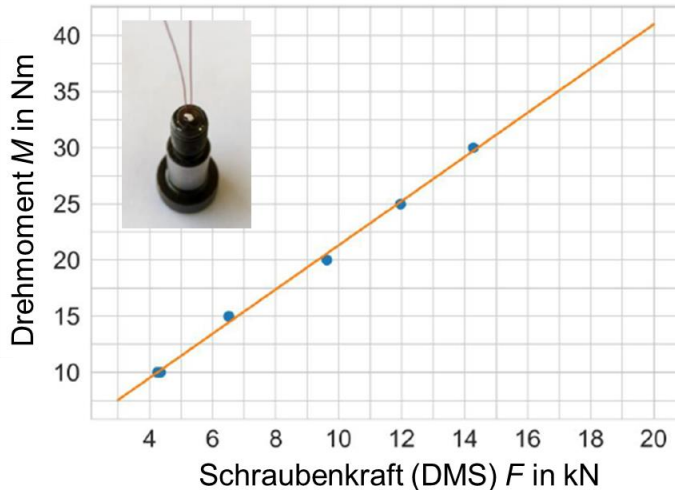


Abbildung 18: Schraubenvorspannkraft in Abhängigkeit des Drehmoments, Mutterproben

Hierzu wurden spezielle Dehnmesstreifen (Typ HBK LB11, Abbildung 13) für Messungen in Schrauben gemäß Herstellerangaben appliziert. Für die Kalibrierung dieser Messschrauben wurde die instrumentierte Schraube mittels spezieller Adapter in der Prüfmaschine zugbeansprucht und so ein Zusammenhang zwischen aufgebrachtener Last und angezeigter Dehnung ermittelt. In einem weiteren Schritt wurde dann der Zusammenhang zwischen dem aufgetragenen Drehmoment (gemäß Anzeige des für alle Versuche genutzten, handgeführten Drehmomentschlüssels) und der resultierenden Schraubenvorspannung für die Montage des Mutteradapters abgeleitet. Für die Versuche wurde dann überwiegend normale, nicht instrumentierte Schrauben eingesetzt und die vorgesehene Schraubenvorspannung mittels Drehmomentenverfahren aufgebracht. Die Vorspannkraft wurde stichprobenartig mit Messschrauben überprüft. Für die Montage wurde eine Verfahrensvorschrift erstellt: Reinigen der Kontaktflächen, Positionieren des Adapters mit Blick auf die Position P1 bzw. P2 der Muttersegmente, Eindrehen der Schraube mit Hand bis kurz vor Kontakt, Einsprühen der Kontakt- und Gewindebereiche mit Sprühöl, Weiterdrehen mit Hand bis Kontakt mit leichter Vorspannung, Aufbringen des Drehmomentes mit dem handgeführten Drehmomentschlüssel (Knackschlüssel) in einem Zug. Es sei angemerkt, dass die aus den Messschrauben herausgeführte Verkabelung relativ empfindlich auf die beim Einbau unvermeidlich entstehenden, mechanischen Bewegungen reagiert. Ab ca. 5 Montagevorgängen traten Messfehler auf. Ebenso ist die

Applikation der Schrauben-DMS fehleranfällig (wobei die Fehler leider nicht ausgemacht werden konnten), sodass insgesamt 3 Messschrauben schon vor Beginn der eigentlichen Messungen aussortiert werden mussten.

Die Schwingfestigkeitsversuche der Mutterproben wurden überwiegend mit einer Vorspannkraft von $F_p = 14 \text{ kN}$ durchgeführt. Die durchgeführten Schwingfestigkeitsversuche mit einer Vorspannkraft von $F_p = 10 \text{ kN}$ ergaben keine nennenswerten Unterschiede in der Schwingfestigkeit.

Unterhalb von Anzugsdrehmomenten $M < 4 \text{ Nm}$ zeigen sich nichtlineare Korrelationen zwischen Anzugsdrehmomenten M und Vorspannkraften F_p . Aus diesem Grund wurde eine lineare Regression in einem Bereich von $M = 4 \text{ Nm} - 30 \text{ Nm}$ durchgeführt, die sich wie folgt zusammensetzt:

$$F_p = 510 \frac{1}{\text{m}} \cdot M - 818 \text{ N} \quad (4)$$

3.2 Versagenskriterien und -verhalten

Zur Ermittlung der Wöhlerlinien – Kraft-, Strukturspannungs- und Kerbspannungswöhlerlinien – in Abschnitt 3.3 wurden alle Schwingfestigkeitsversuche auf servohydraulischen Prüfmaschinen kraftgeregelt, unter Raumtemperatur, bei Prüffrequenzen zwischen $f = 3 - 30 \text{ Hz}$, mit konstanten Amplituden F_a , mit Lastverhältnissen von $R_F = 0,1$, $R_F = 0,5$ und $R_F = 10$ bis zur vordefinierten Abschaltung der Versuchseinrichtung der servohydraulischen Prüfmaschinen durchgeführt. Mit Hilfe der Datenerfassung werden zwei Versagenskriterien für die Ableitung von Versagensschwingspielzahlen definiert:

1. Versagenskriterium „Bruch“ (siehe Abschnitt 3.2.1)
Bruchschwingspielzahl bei Abschaltung des Versuchs mit definierter Verschiebungsänderung, deutlichem Rissfortschritt ins Grundblech und signifikantem Abfall der Probensteifigkeit
2. Versagenskriterium „Anriss“ (siehe Abschnitt 3.2.2)
Anrisschwingspielzahl ermittelt für einen definierten zyklischen Steifigkeitsabfall bzw. eine definierte Zunahme der Verschiebungsamplitude infolge der zyklischen Belastung (hier: 8 % Änderung)

3.2.1 Versagenskriterium „Bruch“

Dazu wurde jeweils eine Zunahme der Wegamplitude des Zylinders der Prüfmaschinen von $\Delta x_a \geq 3 \text{ mm}$ (Bolzen-Axialzugbelastung), $\Delta x_a \geq 5 \text{ mm}$ (Mutter-Axialzugbelastung), $\Delta x_a \geq$

3 mm (Bolzen-Schrägzugbelastung) und $\Delta x_a \geq 8$ mm (Mutter-Schrägzugbelastung) verwendet.

Für die Mutter-Schrägzugbelastung wurde als Versagenskriterium etwas schärfer eine Zunahme der Maximalverformung um 3 mm definiert ($\Delta x_{max} = 3$ mm), da für weiteres Risswachstum eine deutliche Zunahme der Verformungen verbunden mit einer nichtlinearen Änderung der geometrischen Verhältnisse des statischen Systems zu beobachten war. Die Versuche wurden darüber hinaus bis zu einer Weggrenze von $x_m + 8$ mm bzw. bis $N = 2 \cdot 10^6$ als Abschaltkriterium gefahren.

Im Folgenden wird die erreichte Schwingspielzahl N bis zum Abschalt- bzw. Versagenskriterium als Versagensschwingspielzahl N_f bezeichnet. Hinsichtlich der Regelstabilität wurden die Versuche unter variablen Amplituden kraft geregelt mit Prüffrequenzen $f \leq 3.5$ Hz gefahren.

Bei allen Mutterproben und den Bolzenproben 210-16 und 700-16 kam es zu Rissinitiierungen beginnend an der Schweißnaht (Blechoberfläche der aufgeschweißten Verbindungselemente) und zu Rissfortschritt durch das Blech. Bei erreichtem Abschaltkriterium sind somit deutlich sichtbare Risslängen a auf der Oberfläche der Rückseite von $a > 5$ mm zu sehen, Abbildung 19. In einigen wenigen Fällen der Bolzenproben 210-08, kam es zu Rissinitiierungen ausgehend von der Adapterinnenseite, Abbildung 19 (1). Diese Versuche wurden bei der Versuchsauswertung nicht betrachtet.

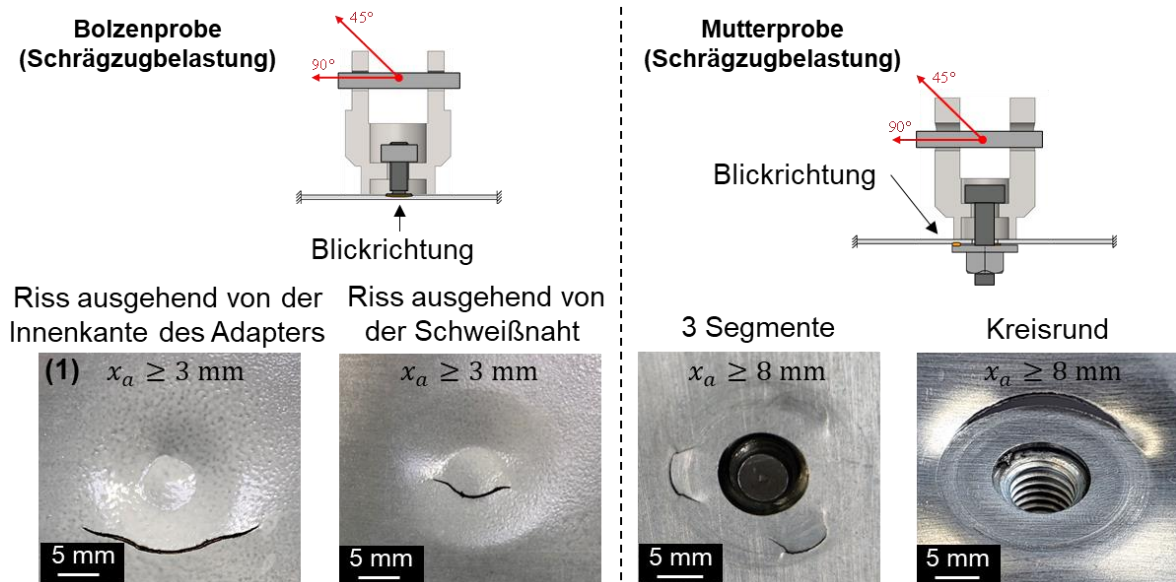


Abbildung 19: Beispielhafte Versagensbilder der Rückseite von Bolzen- und Mutterproben unter Schrägzugbelastung

3.2.2 Versagenskriterium „Anriss“

Während der Schwingfestigkeitsversuche wurde die zyklische Steifigkeit der Proben bzw. die Zunahme der Verschiebungsamplitude infolge der zyklischen Belastung aufgezeichnet. Im Falle eines kraftgeregelten Schwingfestigkeitsversuchs kann mit der zyklischen Steifigkeit k_{cyc} beschrieben werden, welche Verschiebungsamplitude des Zylinders x_a sich ergibt, um die (konstant-gehaltene) Kraftamplitude F_a zu erzeugen. Diese ist wie folgt definiert:

$$k_{cyc} = \frac{F_a}{x_a} \quad (5)$$

Zusätzlich kann die zyklische Steifigkeit k_{cyc} als relative Größe aufgetragen werden, um eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Beanspruchungshorizonten zu ermöglichen. Dazu wird die sogenannte Initialsteifigkeit k_0 verwendet. Diese beschreibt die vorliegende zyklische Steifigkeit k_{cyc} nach Einschwingvorgängen sowie auftretende Effekte wie Setzprozesse und Verfestigungen des Werkstoffs. Die zyklische Steifigkeitsänderung Δk_{cyc} wird demnach wie folgt berechnet:

$$\Delta k_{cyc} = \frac{k_{cyc}}{k_0} - \frac{k_0}{k_0} \quad (6)$$

Im Falle der Bolzenproben 210-08 unter reiner Axialzugbelastung sind bei einem zyklischen Steifigkeitsabfall von $\Delta k_{cyc} = 5\%$ erste sichtbare technische Anrisslängen von $a \geq 1$ mm auf der Oberfläche der Rückseite zu erkennen. Bei den Proben 210-16 und 700-16, insbesondere im Falle von niedriger Kraftamplitude F_a , sind dagegen noch keine sichtbaren technische Anrisse zu erkennen. Für das Versagenskriterium „Anriss“, wurde daher jeweils die Schwingspielzahl N bei einem etwas erhöhten zyklischen Steifigkeitsabfall von $\Delta k_{cyc} = 8\%$ ermittelt. Diese wird im Weiteren als Anriss-Schwingspielzahl $N_{A(k_{cyc}=\Delta 8\%)}$ bzw. N_A bezeichnet.

Alternativ kann die zyklische Steifigkeitsänderung direkt über die Wegamplitude angegeben werden:

$$\Delta k_{cyc} = \frac{x_{a,0}}{x_a} - 1, \quad (7)$$

wobei $x_{a,0}$ die Wegamplitude ist, wiederum nach Einschwingvorgängen sowie auftretenden Effekten wie Setzprozess und Verfestigung des Werkstoffs. Für die Mutter-Schrägzugproben (Mutterverbund) wurde $x_{a,0}$ einheitlich bei $n = 300$ Schwingspielen abgelesen. Bei einem Steifigkeitsabfall nach Abbildung 20 vergrößert sich die Wegamplitude und das Versagenskriterium kann direkt als Änderung derselben an der Prüfmaschine überprüft werden.

Im Falle der Bolzen- und Mutterproben sind zwei unterschiedliche Arten von Steifigkeitsverläufen zu beobachten, Abbildung 20. Der typische und vorwiegend vorkommende Steifigkeitsverlauf zeigt einen stabilisierten nahezu konstanten Kurvenverlauf und anschließend einen beginnenden beschleunigten zyklischen Steifigkeitsabfall Δk_{cyc} , Abbildung 20. Im Gegensatz dazu zeigen ein Teil der Proben, insbesondere aber die Bolzenproben 210-08 und 210-16 mit sehr hohen Kraftamplituden F_a stetig ansteigende zyklische Steifigkeiten k_{cyc} bis zum Erreichen der Versagenschwingenspielzahl N_f , Abbildung 21. Eine mögliche Begründung dafür könnten Plastifizierungen sein, was jedoch im Zuge dieser Arbeit nicht belegt werden konnte. Aufgrund der möglichen Plastifizierungen und nicht möglichen Auswertung der zyklischen Steifigkeitsabfälle von $\Delta k_{cyc} = 8\%$ wurden diese Proben in dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet.

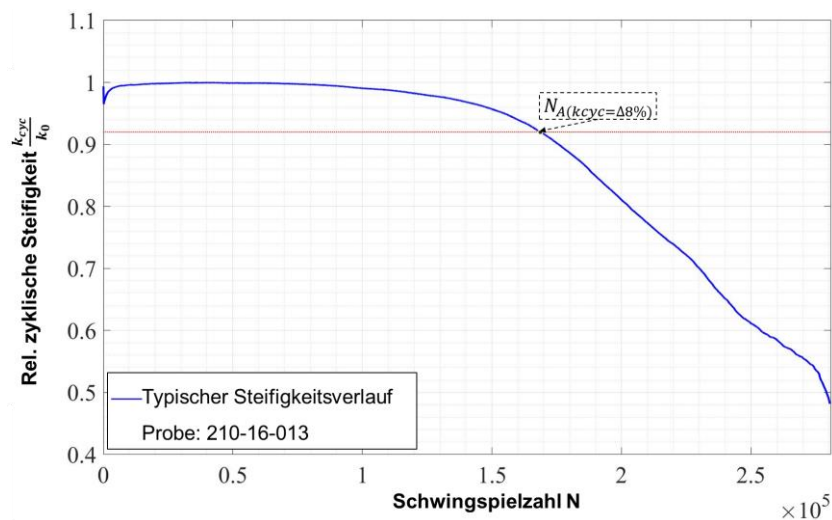


Abbildung 20: Beispielhafter typischer zyklischer Steifigkeitsverlauf einer Bolzenprobe unter Schrägzugbelastung

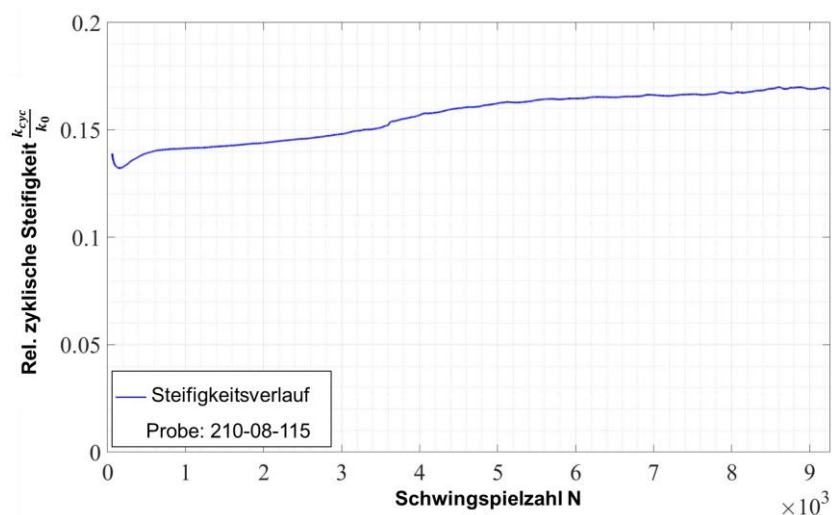


Abbildung 21: Beispielhafter ansteigender zyklischer Steifigkeitsverlauf einer Bolzenprobe unter Schrägzugbelastung

3.3 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Bolzen- und Mutterproben unter Axialzugbelastung ohne Vorspannung und unter Schrägzugbelastung (mit 45° und 90° zur Mittelachse des Verbindungselements) mit Montagevorspannung sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt. Dabei sind in Abbildung 22 die jeweilige Kraftamplituden F_a über den erreichten Versagensschwingspielzahlen N_f (Kriterium „Bruch“) und in Abbildung 23 über den erreichten Anrisschwingspielzahlen $N_{A(kcyc=\Delta 8\%)}$ (Kriterium „Anriss“) aufgetragen. Die Einzelergebnisse und Auswertung der Wöhlerlinien individuell für jede Wöhlerlinie sind im Anhang (Anhang A für Bolzenproben und Anhang B für Mutterproben) dokumentiert.

3.3.1 Axialzugbelastung ohne Vorspannung

In Bezug auf die Versagensschwingspielzahlen N_f zeigen die Mutterproben mit Punktschweißungen mit drei Segmenten unter Axialzugbelastung (N-3S_210-16_ax und N-3S_700-16_ax) die höchsten zyklischen Belastbarkeiten. Eindeutige Einflüsse, hervorgerufen durch den verwendeten Werkstoff oder das verwendete Lastverhältnis R_F , auf die Schwingfestigkeit sind nicht zu erkennen. Die kreisrund geschweißten Mutterproben unter Axialzugbelastung (N-C_210-16_ax) zeigen im Vergleich zu N-3S_210-16_ax ähnliche, jedoch tendenziell niedrigere erreichte Versagensschwingspielzahlen N_f bei jeweils identischen Kraftamplituden F_a . Dies lässt sich durch eine frühere Rissinitiierung und dadurch längere Rissfortschrittsphase der Mutterproben mit Punktschweißungen mit drei Segmenten (N-3S_210-16_ax) gegenüber den kreisrund geschweißten Mutterproben (N-C_210-16_ax) erklären. Dies hat einen signifikanten Einfluss auf die Summe der erreichten Versagensschwingspielzahlen N_f . Mit Bezug auf die Anrisschwingspielzahlen $N_{A(kcyc=\Delta 8\%)}$ wird ersichtlich, dass die kreisrund geschweißten Mutterproben (N-C_210-16_ax) im Vergleich zu den Mutterproben mit Punktschweißungen mit drei Segmenten (N-3S_210-16_ax) höhere Anrisschwingspielzahlen $N_{A(kcyc=\Delta 8\%)}$ bei vergleichbaren Kraftamplituden F_a erzielen, Abbildung 23. Dies lässt sich durch homogenere lokale Spannungsverteilungen erklären, welche zu einer längeren Rissinitiierungsphase führen.

Die Bolzenproben B_700-16_ax und B_210-16_ax zeigen im Vergleich zu den Mutterproben N-C_210-16_ax, N-3S_210-16_ax und N-3S_700-16_ax tendenziell niedrigere zyklische Belastbarkeiten mit Bezug auf die Versagensschwingspielzahlen N_f . Jedoch zeigen diese, aufgetragen über den Anrisschwingspielzahlen $N_{A(kcyc=\Delta 8\%)}$, vergleichbare zyklische Belastbarkeiten. Die niedrigsten zyklischen Belastbarkeiten von Proben unter reiner Axialzugbelastung zeigen die Bolzenproben B_210-08_ax, was auf die geringe Blechdicke t zurückzuführen ist. Dabei liegt die zyklische Belastbarkeit ca. um den

Faktor 2-3 unterhalb der Bolzenproben B_210-16_ax. Auch bei diesen Proben ist kein eindeutiger Einfluss durch die untersuchten Lastverhältnisse R_F zu erkennen.

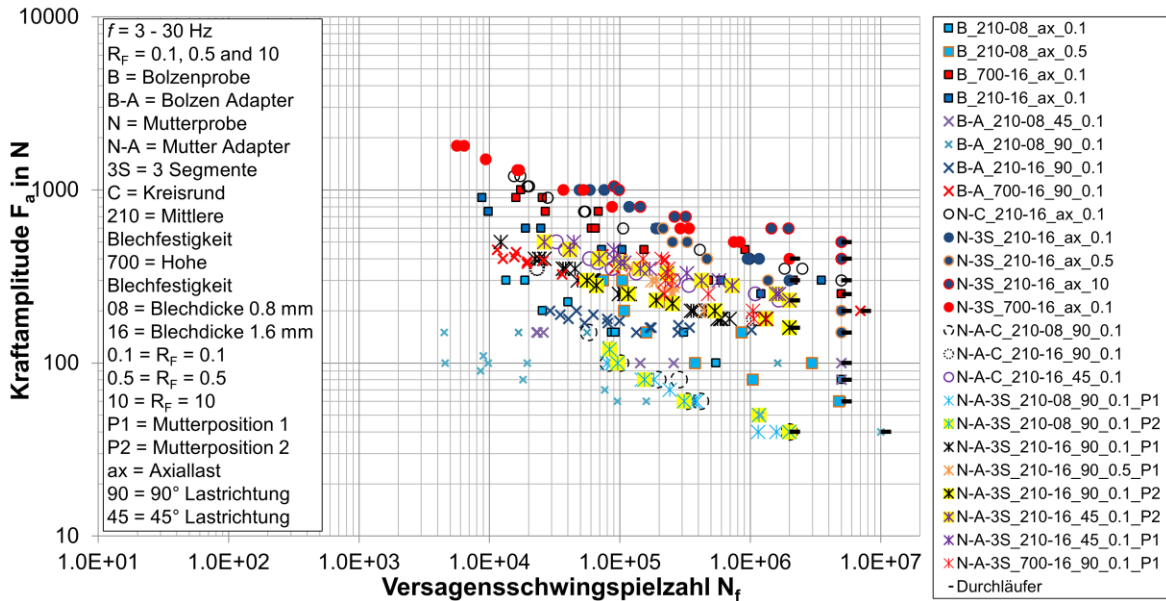


Abbildung 22: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Bolzen- und Mutterproben, Kraftamplitude aufgetragen über der Versagensschwingspielzahl N_f

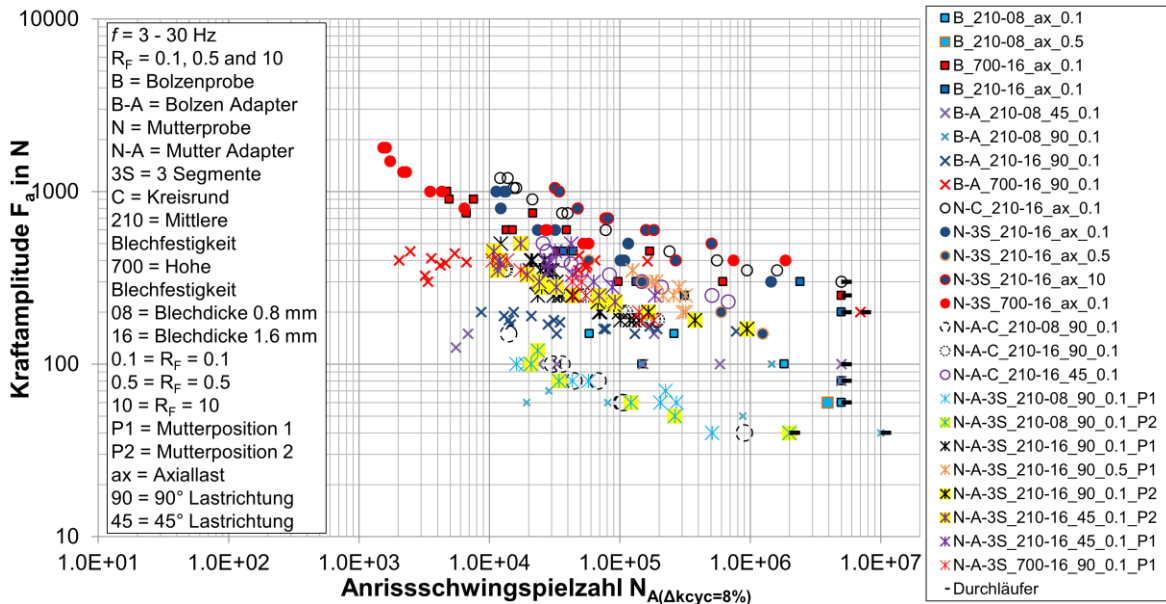


Abbildung 23: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Bolzen- und Mutterproben, Kraftamplitude aufgetragen über der Anrisschwingspielzahl $N_{A(kcyc=\Delta 8\%)}$

3.3.2 Schrägzugbelastung

Im Falle der Schrägzugversuche und mit Bezug auf die Versagensschwingspielzahlen N_f weisen die Bolzenproben B-A_700-16_90 und Mutterproben N-A-3S_210-16_90, N-A-3S_700-16_90 und N-A-C_210-16_90 ähnliche Schwingfestigkeiten auf, Abbildung 22. Aufgrund der Schrägzugbelastung von 90° zur Mittelachse des Verbindungselements liegen die zyklischen Belastbarkeiten unterhalb der Proben mit reiner Axialzugbelastung.

Die niedrigsten zyklischen Belastbarkeiten weisen die Proben B-A_210-08_90 auf, was auf die geringe Blechdicke t zurückzuführen ist. Die Proben weisen ebenfalls die geringsten Anzugsmomente M auf, welche deutlich unterhalb des maximal möglichen Drehmoments von $M = 8.8 \text{ Nm}$ liegen. Bei diesen Proben lässt sich ein Anstieg der Schwingfestigkeit mit zunehmendem Drehmoment M erkennen, Abbildung 24.

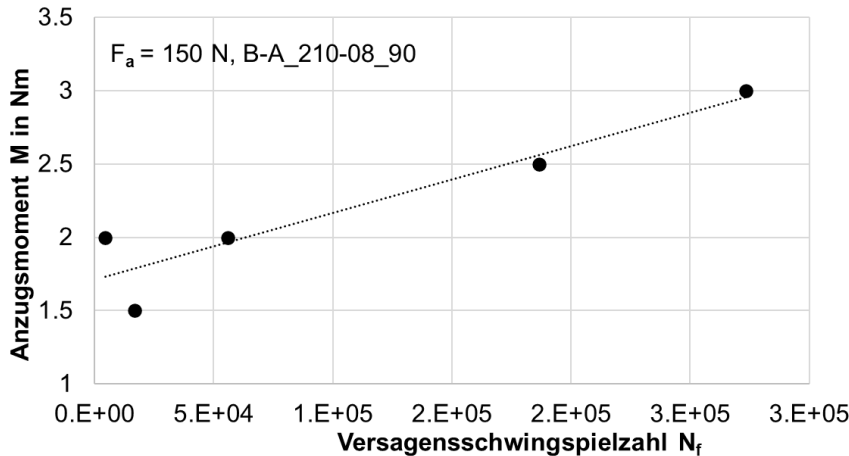


Abbildung 24: Einfluss des Anzugsmoments auf die Schwingfestigkeit, Probe B-A_210-08_90

Die Proben B-A_210-08_ax_45 (Belastung 45° zur Mittelachse des Verbindungselements) ordnen sich tendenziell zwischen den beiden Probenvarianten B-A_210-16_ax_90 und B-A_210-08_90, was auf die Lastrichtung zurückzuführen ist.

Die Proben N-A-3S_210-08_90 mit Position P1 und P2, N-A-C_210-08_90, B-A_210-08_ax_45 und einige wenige Bolzenproben B-A_210-08_90 zeigen vergleichbare zyklische Belastungen. Tendenziell weisen die Proben B-A_210-08_90 jedoch deutlich geringere Versagenschwingspielzahlen N_f auf. Mit Bezug auf die Anrisschwingspielzahlen $N_{A(kcyc=\Delta 8\%)}$ lassen sich ähnliche Zusammenhänge zwischen den Probenvarianten erkennen. Jedoch liegen die Anrisschwingspielzahlen $N_{A(kcyc=\Delta 8\%)}$ im Falle der Proben N-A-3S_210-08_90 mit Position P1 und P2, N-A-C_210-08_90, B-A_210-08_ax_45 und B-A_210-08_90 näher zusammen, Abbildung 23.

Besonders auffällig sind die ca. um den Faktor 2 niedrigeren zyklischen Belastbarkeiten der Bolzenproben B-A_210-16_90 im Vergleich mit B-A_700-16_90. Erklären lässt sich dies durch die tatsächlich vorliegenden bzw. wirkenden Vorspannkkräfte F_P während der Schwingfestigkeitsversuche. Im Falle der Bolzenproben B-A_210-16_90 konnten mit Hilfe des DMS-Adapters Veränderungen der Dehnungsamplituden ε_a während der Schwingfestigkeitsversuche festgestellt werden. Die ausgewerteten Werte der Dehnungsmessstreifen 1-4 repräsentieren die vorliegende Vorspannkraft F_P . Zeigen diese ein konstantes Verhalten, kann von einer konstanten Vorspannkraft F_P ausgegangen werden. Zu beobachten war dieses Verhalten jedoch nur im Falle der höchsten

Drehmomente von $M = 5 \text{ Nm}$ kombiniert mit geringen Kraftamplituden von $F_a \leq 165 \text{ N}$, Abbildung 25. In dem Beispiel in Abbildung 25 ist ein nahezu konstanter Verlauf der Dehnungsamplituden ε_a bis $N = 5 \cdot 10^5$ Schwingspiele zu sehen. Der Abfall der Messwerte von DMS-2 hat Anstiege der Werte von DMS-1, DMS-3 und DMS-4 zur Folge. Kurz nach Erreichen der Anrisschwingspielzahl $N_{A(kcyc=\Delta 8\%)}$ fallen die Werte von DMS-2 auf null. Das bedeutet, dass der Adapter einseitig abgehoben ist. Dieses Abheben führt anschließend zu einem beschleunigten Probenversagen.

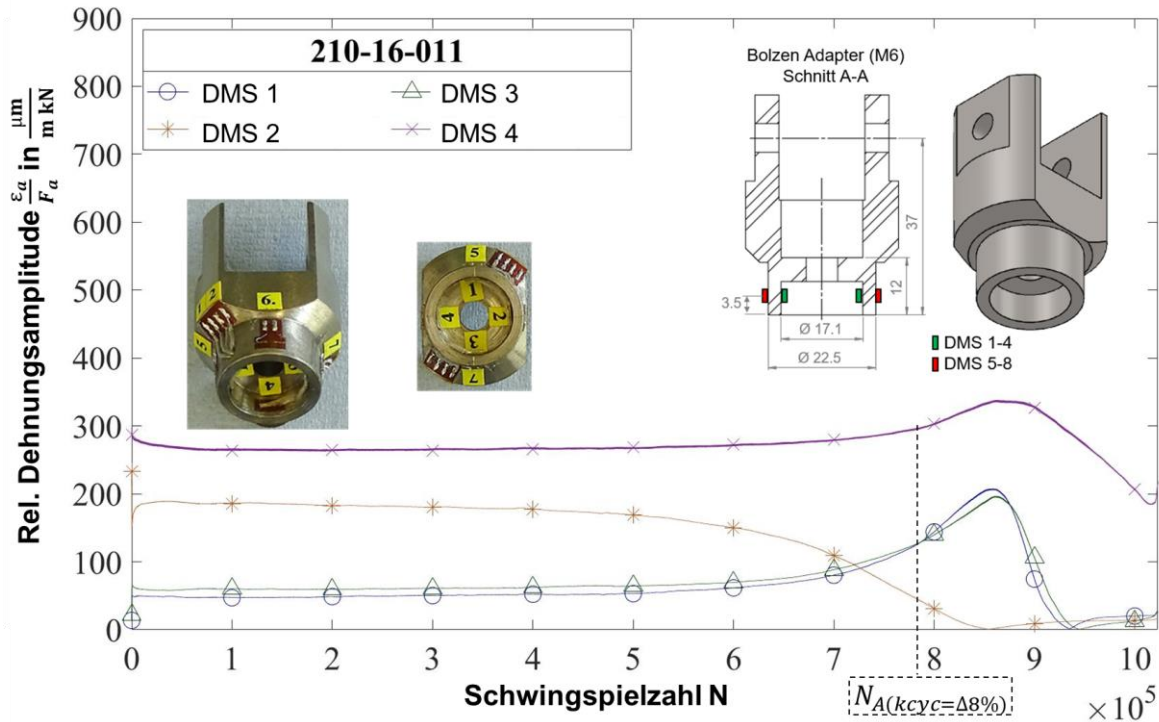


Abbildung 25: Dehnungsamplitudenverlauf der Probe 011, B-A_210-16_90

Tendenziell sind bei den Versuchen mit hohen Kraftamplituden von $F_a > 170 \text{ N}$ bereits nach wenigen Schwingspielen N die Werte der Dehnungsmessstreifen 1-3 und demnach auch die Vorspannkraft F_p nahezu null, Abbildung 26. Bei diesen Versuchen kann die Annahme einer konstant anliegenden Vorspannkraft F_p , während der Schwingfestigkeitsversuche, nicht getroffen werden, was in den Simulationen berücksichtigt werden muss.

Der Abfall der Werte von DMS-2 kann durch Plastifizierungseffekte, selbständiges Lösen der Schraubverbindung und/ oder durch Rissinitiierung und Rissfortschritt erklärt werden. Eine Differenzierung zwischen den genannten möglichen Einflüssen war im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich. Jedoch kann festgehalten werden, dass ein frühzeitiger Vorspannkraftverlust bei den hier untersuchten Proben zu deutlich niedrigeren Schwingfestigkeiten geführt hat. Zudem ist anzunehmen, dass auch die Bolzenproben B-A_210-08_90 aufgrund der geringen Blechdicke von $t = 0,8 \text{ mm}$ und des geringen

Drehmoments M frühzeitige Vorspannkraftverluste aufweisen, was bei der Schwingfestigkeitsbewertung berücksichtigt werden muss.

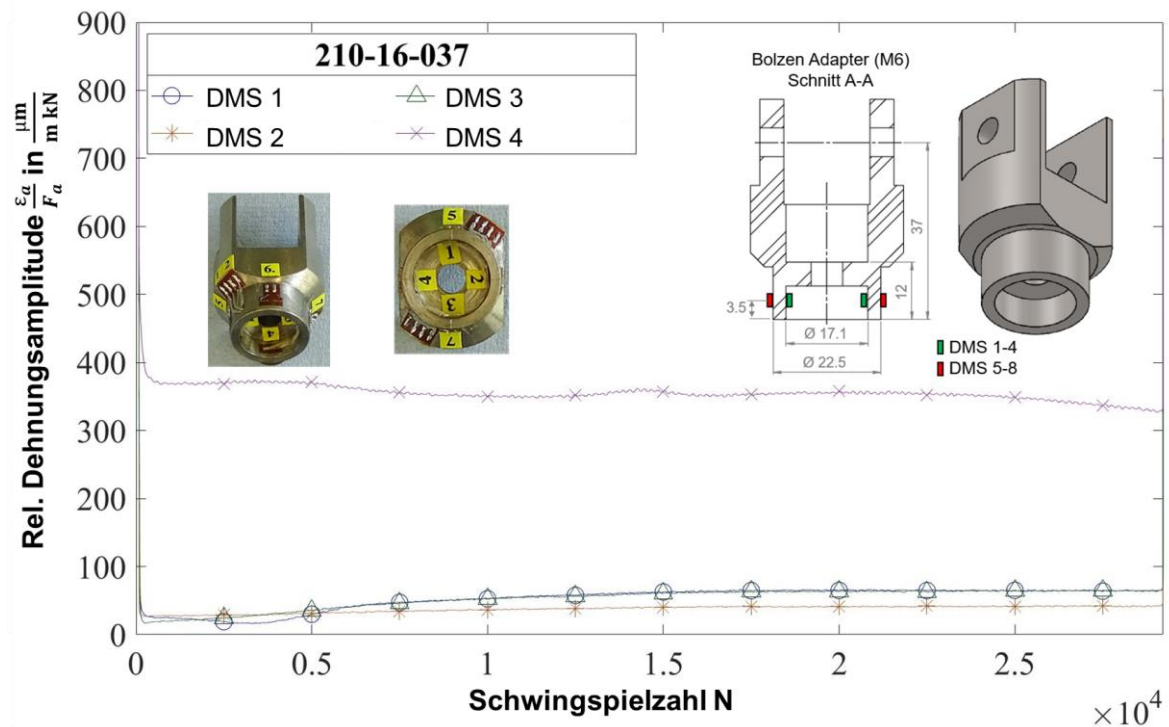


Abbildung 26: Dehnungsamplitudenverlauf der Probe 037, B-A_210-16_90

3.3.3 Mutterverbund mit Schrägzugbelastung

Die über einen Adapter belasteten Mutterproben werden als Mutterverbundproben bezeichnet (gemäß Abbildung 9 rechte Spalte und Abbildung 13 unten). Als Standard werden die Versuche zum Mutterverbund (MV) für einen Winkel von 90° zwischen Lastrichtung und Längsrichtung des Adapters durchgeführt. Für diesen Fall wird im Verbindungsmittel infolge der Prüfmaschinenlast im Wesentlichen ein Biegemoment eingeleitet. Für einen Winkel von 45° wird außer einem resultierenden Biegemoment auch eine Zugkomponente eingeleitet.

Die Versuche wurden gemäß Kapitel 3.1 durchgeführt. Als Versagenskriterium wurde dabei durchgehend eine Zunahme der Maximalverformung um 3 mm definiert ($\Delta x_{max} = 3 \text{ mm}$), als Anrisskriterium wurde eine Änderung der Wegamplitude um 8 % definiert, siehe Kapitel 3.2. Bezugswerte sind jeweils die Maximalverformung bzw. Wegamplitude bei $n = 300$ Schwingspielen. Als Prüffrequenz wurde für alle Versuche einheitlich $f = 3 \text{ Hz}$ festgelegt.

Die Wöhlerlinien zum Mutterverbund sind jeweils mit ca. 10 Versuchen im Bereich von etwa 10.000 bis max. 2 Mio. Schwingspielen belegt. Für die Variante mit variablen Amplituden

(VAL) wurden 4 Versuche mit einer Gauß-Lastfolge mit einem Umfang von ca. $5 \cdot 10^4$ Schwingspielen und einer Maximalamplitude entsprechend dem höchsten Lastniveau der Referenz gefahren.

Eine Übersicht über die Versuchsreihen zum Mutterverbund kann Tabelle 4 entnommen werden. Die Referenzserie ist ockerfarben hinterlegt, für die Varianten ist die Veränderung zur Referenz jeweils rot markiert.

Tabelle 4: Übersicht über die Versuche zum Mutterverbund

lfd. Nr.	Schweißmutter	Blechmaterial, Festigkeit	Blechedicke	Position P	Lastrichtung L	Überlasten Pü	Vorspannkraft F	Lastverhältnis R	Lastart
1	3 S	CR210	1.6 mm	1	90°	0	1	0.1	CAL
2	3 S	CR210	0.8 mm	1	90°	0	1	0.1	CAL
3	3 S	CR210	0.8 mm	2	90°	0	1	0.1	CAL
4	KR	CR210	0.8 mm	-	90°	0	1	0.1	CAL
5	3 S	CR210	1.6 mm	1	90°	0	1	0.5	CAL
6	3 S	CR210	1.6 mm	1	90°	0	1	0.1	VAL
7	3 S	CR700	1.6 mm	1	90°	0	1	0.1	CAL
8	3 S	CR210	1.6 mm	1	90°	0	2	0.1	CAL
9a, 9b	3 S	CR210	1.6 mm	1	90°	1 (ÜD, ÜZ)	1	0.1	CAL
10	3 S	CR210	1.6 mm	1	45°	0	1	0.1	CAL
11	3 S	CR210	1.6 mm	2	90°	0	1	0.1	CAL
12	3 S	CR210	1.6 mm	2	45°	0	1	0.1	CAL
13	KR	CR210	1.6 mm	-	90°	0	1	0.1	CAL
14	KR	mittlere	1.6 mm	-	45°	0	1	0.1	CAL

3S: 3 Segmente, KR: kreisrund, Position P1: 1 Segment unter Biegezug, P2: 2 Segmente unter Biegezug, L1: 90°, L2: 45°, Pü0: ohne Überlast, Pü1: mit einzelner Anfangs-Überlast (ÜD: Drucküberlast, ÜZ: Zugüberlast), Vorspannkraft F1: 14 kN, F2: 10 kN, CAL: konstante Amplituden, VAL: variable Amplituden

Referenzprobe MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P1: Mutterverbund, 3 Segmente, Material CR210, $t = 1,6$ mm, $R = 0,1$, Lastrichtung 90°, Vorspannkraft $F = 14$ kN, Position der Mutter 1 Segment unter Biegezug

In den Diagrammen Abbildung 27 und Abbildung 28 sind speziell die experimentell ermittelten Versuchsdaten zu den Versuchsreihen nach Tabelle 4. (mit Ausnahme der Variante VAL) dargestellt. Dabei sind die jeweilige Kraftamplituden F_a in Abbildung 27 über den zugehörigen Versagensschwingspielzahlen N_f und in Abbildung 28 über den entsprechenden Anrisschwingspielzahlen N_A aufgetragen. Die Referenz-Versuchsreihe wird zusätzlich durch eine Regressionsgerade markiert. Diese und die nachfolgenden Diagramme ermöglichen einen guten Vergleich der Mutterverbundversuche untereinander.

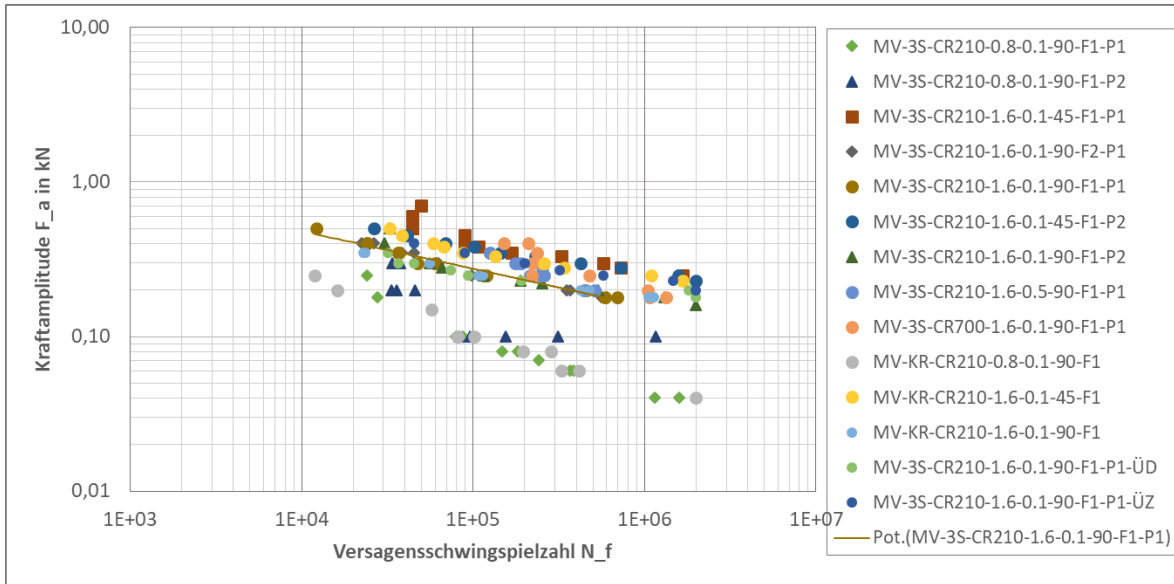


Abbildung 27: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben, Kraftamplitude F_a aufgetragen über der Versagensschwingspielzahl N_f

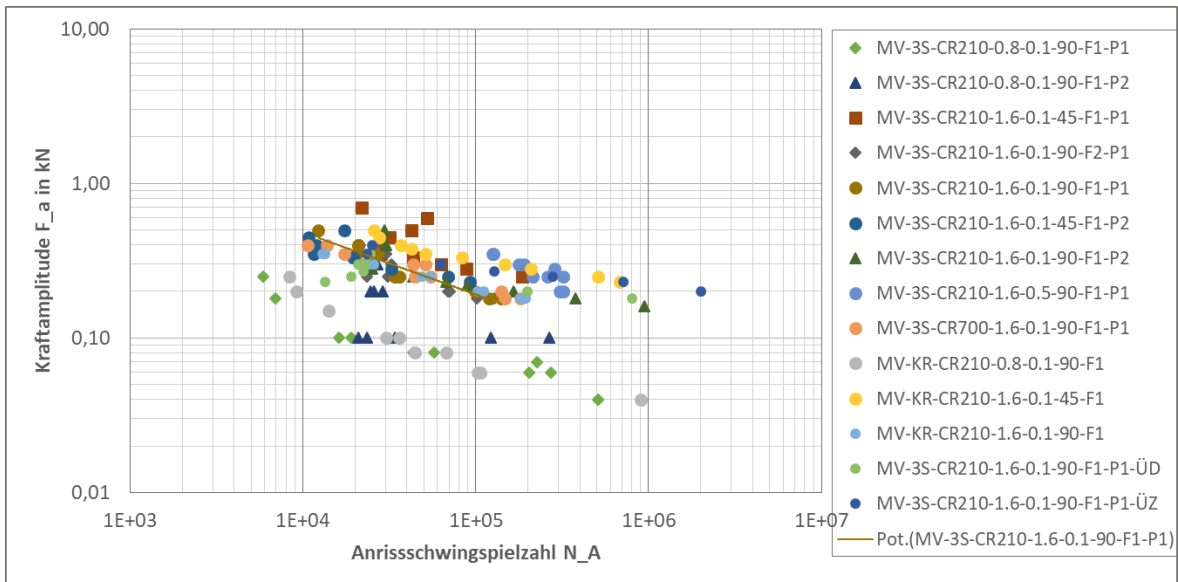


Abbildung 28: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben, Kraftamplitude F_a aufgetragen über der Anrisschwingspielzahl N_A

Wie zu erwarten, fallen die Anrisschwingspielzahlen N_A geringer aus als die Versagensschwingspielzahlen N_f . Für beide Fälle lassen sich drei Bereiche ausmachen: ein mittlerer Datenbereich für die Versuchsreihen mit einer Blechdicke $t = 1,6$ mm und der Lastrichtung 90° , ein klar davon abgetrennter Datenbereich niedrigerer Festigkeit mit Daten aus den drei Versuchsreihen mit einer Blechdicke von $t = 0,8$ mm und ein Bereich größerer Lebensdauern für die Versuche bei einer Lastrichtung von 45° . Die Neigung der voneinander getrennten Datenbereiche zeigt jeweils eine einheitliche Tendenz.

Um weitere Einflüsse zu untersuchen, werden nachfolgend gezielt Daten separiert und für den Fall der Versagenswöhlerdiagramme dargestellt. Für den Vergleich wird jeweils der Referenzfall mit Regressionslinie eingezeichnet.

Anmerkungen zu nichtlinearem Systemverhalten

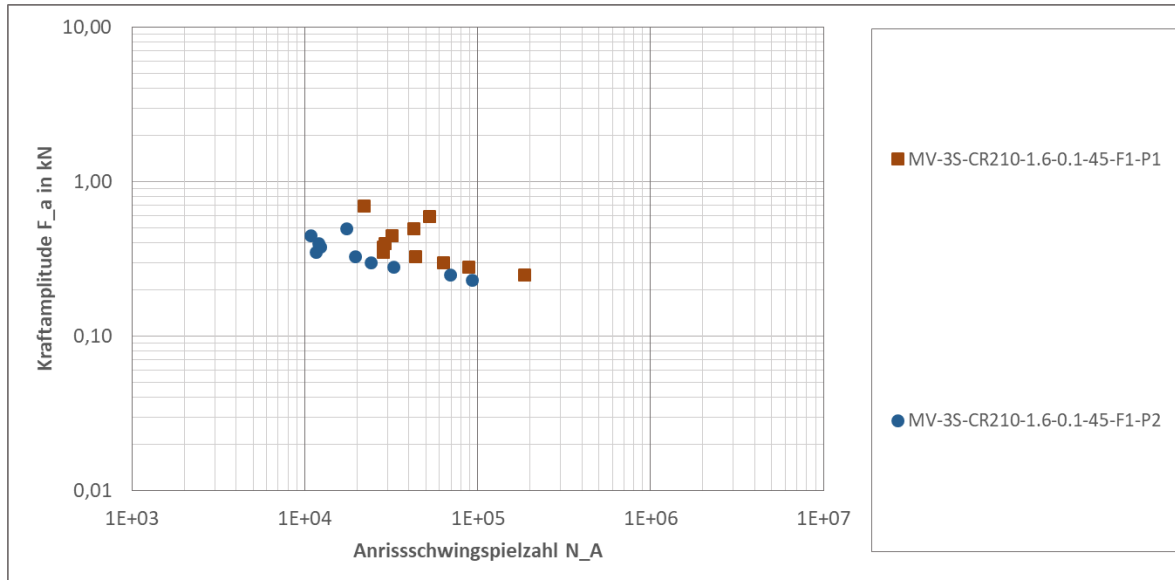


Abbildung 29: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Anrisschwingspielzahl. Varianten: Lastrichtung 45° mit Mutterposition P1 (1 Segment unter Biegezug) und P2 (2 Segmente unter Biegezug)

Für Variante I (s.u.) wird für den Fall des Lastverhältnisses $R = 0,5$ auf das anomale Verhalten hingewiesen, dass sich für höhere Kraftamplituden mit höheren Maximallasten erhöhte Lebensdauern ergeben. Für vergleichsweise hohe Maximallasten haben sich im Versuch deutliche Probenverformungen im Sinne von lokaler Blechbiegung im Mutterbereich ergeben, die zum einen mit größeren plastischen Systemdeformationen und zum anderen mit geometrisch nichtlinearen Effekten und einer Umlagerung von Biege- auf Membranspannungen einhergehen. Im Ergebnis ergeben sich dann für ein vermehrt auf Blechzug beanspruchtes System erhöhte Lebensdauern. Dieser Effekt tritt bei den Versuchsserien mit einer Lastrichtung von 45° für die Auswertung der Anrisschwingspielzahl besonders deutlich hervor (Abbildung 29). Infolge der Zuglastkomponenten wird das Blech aus seiner Mittelebene herausgezogen und vermehrt auf Membranspannungen beansprucht. Der damit verbundene Vorgang der „Zugversteifung“ ist stark nichtlinear von der Zuglast abhängig. Die zuvor versagensmaßgebende Biegebeanspruchung tritt gegenüber der Membranbeanspruchung zurück und es ergeben sich im Ergebnis für das vermehrt auf Blechzug beanspruchte System erhöhte Lebensdauern. Hinzu kommen lokale Effekte in den Kerbbereichen der Schweißnähte, die im Abschnitt „Einmalige Anfangsüberlasten“ näher erläutert werden. Die genannten Effekte sind deutlich systemabhängig (Blechdicke, -festigkeit, Systemsteifigkeit,

etc.) und das im Rahmen des Vorhabens beobachtete nichtlineare Systemverhalten daher nicht verallgemeinerbar. Hinzu kommt, dass die Effekte mit einer geometrisch und werkstofflich linearen Systemanalyse nicht erfasst werden können. Für die Ableitung von Wöhlerlinien werden die entsprechenden Daten mit sichtbar erhöhten Lebensdauern daher nicht angesetzt.

Varianten I: Schraubenvorspannung, R-Verhältnis, Blechfestigkeit

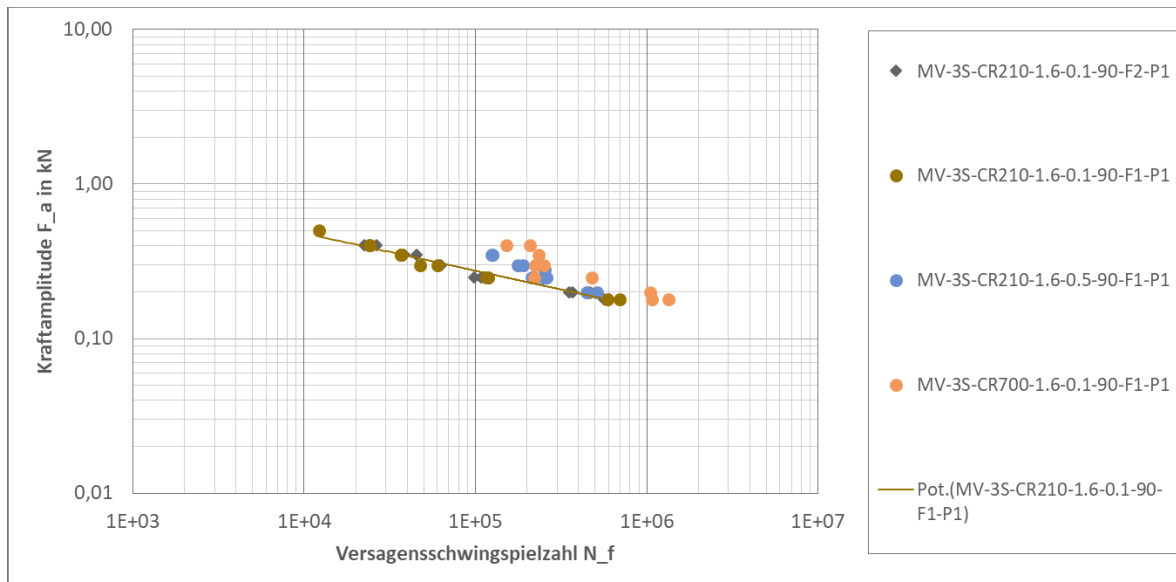


Abbildung 30: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: reduzierte Schraubenvorspannung $F = 10$ kN, R-Verhältnis $R = 0,5$, höhere Blechfestigkeit $R_{p0,2} = 700$ MPa

Alle Proben mit identischem Verbindungsmittel 3S, Blechdicke $t = 1,6$ mm, Lastrichtung 90° , Mutterposition P1. Varianten in Schraubenvorspannung, R-Verhältnis, Blechfestigkeit.

- Für den Fall einer von 14 kN auf 10 kN reduzierten Schraubenvorspannkraft (Fall F2) hat sich kein Einfluss auf die Schwingfestigkeit ergeben.
- Für das von $R = 0,1$ auf $R = 0,5$ (Fall 0.5) erhöhte Spannungsverhältnis hat sich für niedrige Kraftamplituden mit länger laufenden Versuchen ab ca. $4 \cdot 10^5$ Schwingspiele kein Einfluss auf die Schwingfestigkeit ergeben. Für höhere Amplituden zeigt sich eine leicht erhöhte Lebensdauer. Für das Lastverhältnis $R = 0,5$ ist im Vergleich zu $R = 0,1$ bei gleicher Amplitude die Maximallast um den Faktor $(1 - 0,1)/(1 - 0,5) = 1,8$ höher. Als Ursache werden die im Abschnitt „Anmerkungen zu nichtlinearem Systemverhalten“ beschriebenen größeren plastischen Deformationen und geometrisch nichtlinearen Effekte mit einer damit verbundenen Umlagerung von Biege- auf Membranspannungen angenommen.
- Für den Fall einer von $R_{p0,2} = 210$ MPa auf von $R_{p0,2} = 700$ MPa (Nominalwerte) erhöhten Blechfestigkeit ergeben sich etwas höhere Lebensdauern.

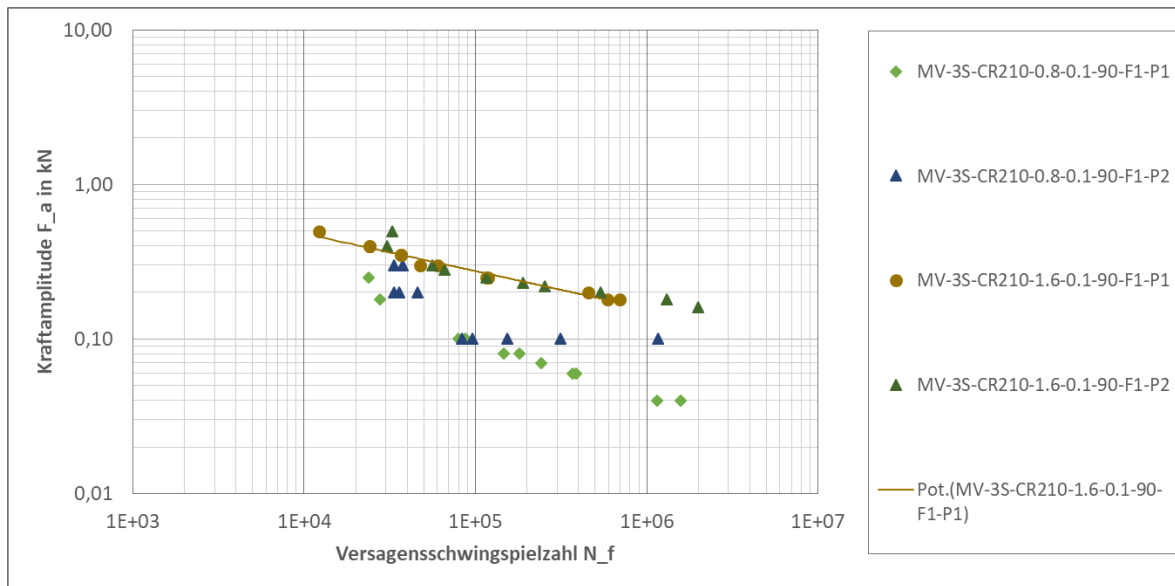
Varianten II: Blechdicke, Mutterposition

Abbildung 31: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: geringere Blechdicke $t = 0,8$ mm, gedrehte Mutterposition P2 mit 2 Segmenten unter Biegezug

Alle Proben mit identischem Verbindungsmittel 3S, R-Verhältnis, Blechmaterial CR210, Lastrichtung 90° , Vorspannkraft F_1 (14 kN). Varianten in Blechdicke, gedrehte Mutterposition.

- Für den Fall einer von $t = 1,6$ mm auf $t = 0,8$ mm reduzierten Blechdicke ergeben sich deutlich niedrigere Lebensdauern. Zu erkennen ist für höhere Lastamplituden eine Tendenz zu längeren Lebensdauern. Ursache hierfür sind die für die Varianten I erläuterten nichtlinearen Effekte.
- Für die von Position P1 (1 Segment unter Biegezug) auf Position P2 (2 Segmente unter Biegezug) gedrehten Muttern ergibt sich für das $t = 1,6$ mm Blech praktisch kein Einfluss auf die Lebensdauern. Für das $t = 0,8$ mm Blech hat sich für das Lastniveau $F_a = 0,1$ kN zunächst eine unerwartet hohe Lebensdauer ergeben und es wurden daher Wiederholversuche gefahren. Die über eine Dekade reichende Streuung der Lebensdauern auf diesem Lastniveau konnte nicht abschließend geklärt werden.

Varianten III: Lastrichtung und Mutterposition

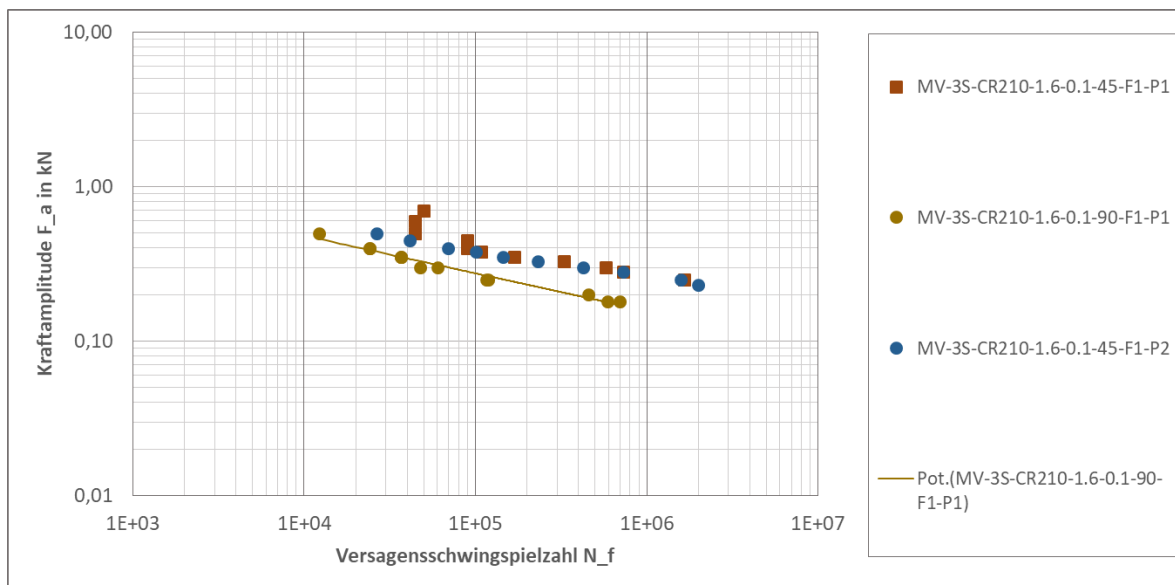


Abbildung 32: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: Lastrichtung 45° mit Mutterposition P1 (1 Segment unter Biegezug) und P2 (2 Segmente unter Biegezug)

Alle Proben mit identischem Verbindungsmittel 3S, Blechdicke, R-Verhältnis, Blechmaterial, Vorspannkraft. Varianten in Lastrichtung, gedrehte Mutterposition.

- Für den Fall der von 90° auf 45° geänderten Lastrichtung (vgl. Abbildung 9) ergeben sich höhere Lebensdauern. Die beiden Fälle sind allerdings nicht direkt miteinander vergleichbar, da für die 90°-Belastung ein aus dem Hebelarm entstehendes Biegemoment in die Anschweißmutter eingeleitet wird, während für die 45°-Belastung neben einem geringeren Biegemoment eine zusätzlich Normalkraft eingeleitet wird.
- Für den Fall der auf 45° geänderten Lastrichtung ergibt sich für eine Änderung der Mutterposition von P1 auf P2 praktisch kein Einfluss auf die Lebensdauern.

Varianten IV: kreisrunde Anschweißmutter mit Blechdicke und Lastrichtung

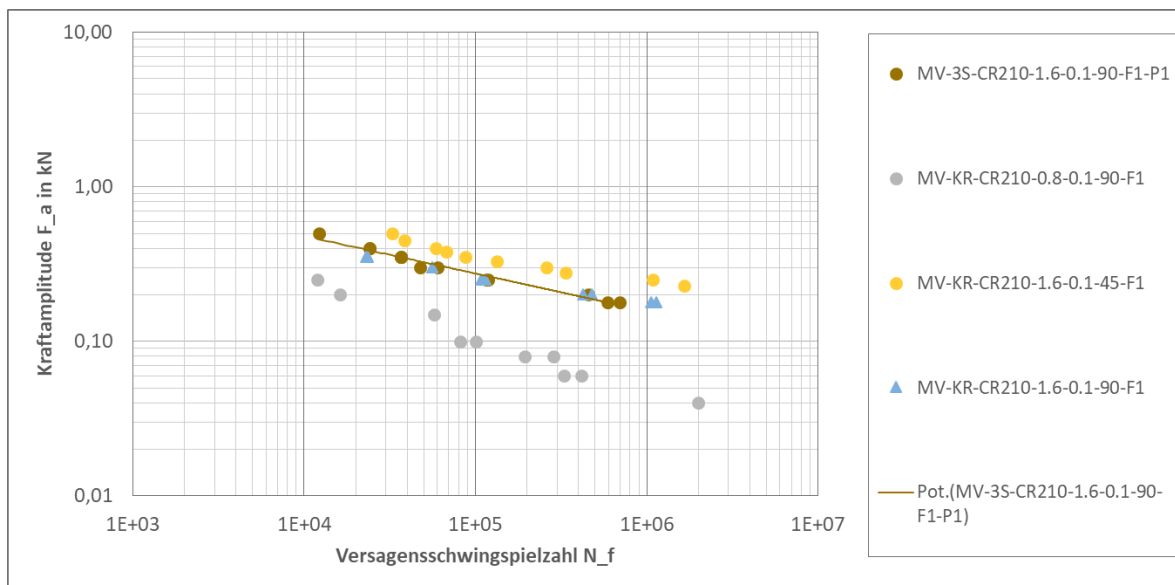


Abbildung 33: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: kreisrunde Anschweißmuttern bei Blechdicken 0,8 mm / 1,6 mm und Lastrichtung 90° und 45°

Alle Proben mit identischem Blechmaterial, R-Verhältnis, Vorspannkraft. Varianten in Typ der Anschweißmuttern, Blechdicke, Lastrichtung.

- Für den Fall der kreisrunden Anschweißmuttern mit umlaufender Schweißnaht hat sich für die Blechdicke $t = 1,6$ mm kein Einfluss auf die Schwingfestigkeit im Vergleich zu den Muttern 3S mit 3 Segmenten.
- Für die kreisrunden Muttern und einer geringeren Blechdicke $t = 0,8$ mm ergeben sich deutlich geringere Lebensdauern.
- Für die Lastrichtung 45° ergeben sich etwas höhere Lebensdauern, siehe hierzu die Erläuterungen unter Varianten III.

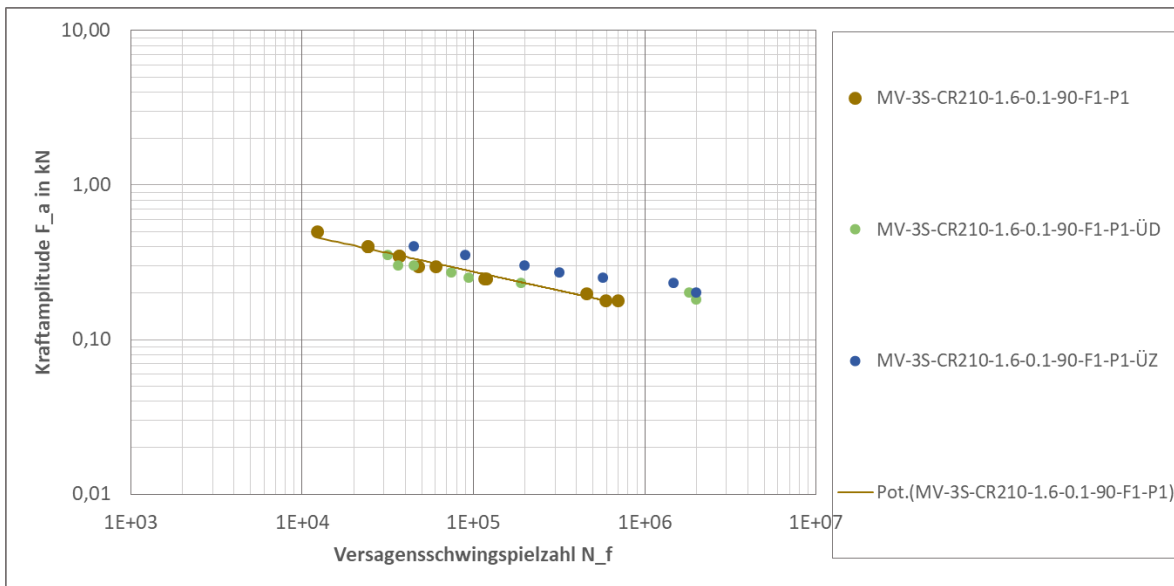
Varianten V: Einmalige Anfangsüberlasten

Abbildung 34: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: Referenzproben mit Zug- bzw. Drucküberlast

Alle Proben mit identischem Verbindungsmittel 3S, R-Verhältnis, Blechmaterial CR210, Lastrichtung 90°, Vorspannkraft F_1 (14 kN). Varianten in einmaliger Überlast zu Versuchsbeginn mit Zugüberlast $F_{ü,max} = 1,1$ kN (ÜZ) bzw. Drucküberlast $F_{ü,min} = -1,1$ kN (ÜD).

Grundsätzlich können in den zugbeanspruchten Schweißnähten der Anschweißmuttern 3S zwei Einflüsse aus einer anfänglichen Zugüberlast erwartet werden: (a) eine Anfangsschädigung z.B. im Sinne von Mikrorissen (Lebensdauerreduktion) und (b) plastisches Deformationsverhalten mit in den auf Zug beanspruchten Kerbbereichen verbleibenden Druckeigenstressungen (Lebensdauererlängerung). Eine Drucküberlast hinterlässt praktisch keine verbleibende Anfangsschädigung, erzeugt jedoch bei lokal plastischem Deformationsverhalten verbleibende örtliche Zugeigenstressungen, die zu einer Lebensdauerreduktion führen. Es wurde entschieden, die Versuchsreihen um den Fall einer Drucküberlast zu ergänzen. Die Ergebnisse sind wieder im Vergleich zum Referenzfall dargestellt.

- Für den Fall ÜZ einer einmaligen Anfangsüberlast als Zuglast $F_{ü,max} = 1,1$ kN hat sich ein lebensdauererlängernder Effekt ergeben. Ursache sind die infolge der Zugüberlast örtlich in den anschließend ebenfalls zugbeanspruchten Kerbbereichen der Schweißverbindung verbleibenden Druckeigenstressungen und das nichtlineare Systemverhalten, wie es im Abschnitt „Anmerkungen zu nichtlinearem Systemverhalten“ erläutert wurde. Hinweise auf eine signifikante Anfangsschädigung haben sich nicht ergeben.

- Für den Fall ÜD einer Anfangsüberlast als Drucklast $F_{ü,min} = -1,1$ kN hat sich eine leichte Lebensdauerreduktion ergeben. Ursache sind die infolge der Drucküberlast örtlich in den anschließend zugbeanspruchten Kerbbereichen der Schweißverbindung verbleibenden Zugeigenspannungen im Zusammenspiel mit dem erwähnten nichtlinearen Systemverhalten. Für geringere zyklische Beanspruchungen mit langen Lebensdauern heben sich die Effekte offenbar gegenseitig auf.
- Eine Verlagerung der Rissausgangsorte wurde nicht beobachtet.
- Der Einfluss der untersuchten Überlasten auf die Schwingfestigkeit bleibt insgesamt gering.

Die werkstofflich und geometrisch nichtlinearen Effekte infolge der Überlasten können bei Ansatz einer linearen Systemanalyse nicht erfasst werden. Der Einfluss einer Anfangsschädigung kann im Rahmen der linearen Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner berücksichtigt werden; er bliebe im vorliegenden Fall einer einmaligen Überlast gering und würde jedenfalls zu geringeren Lebensdauern führen.

Varianten VI: Vergleich mit Mutterproben unter Axialzug

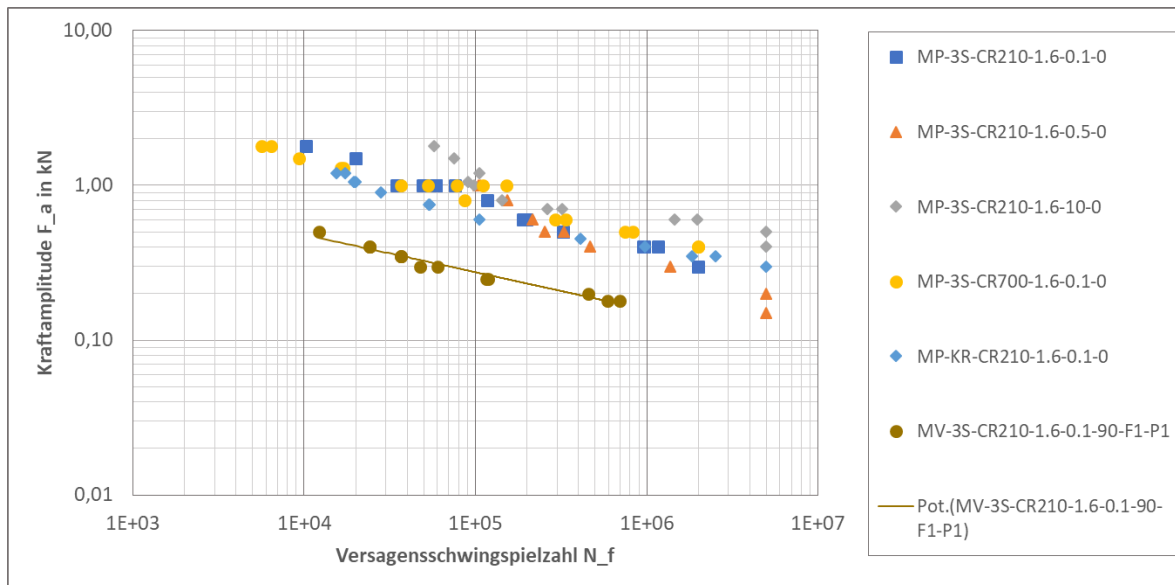


Abbildung 35: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterproben unter Axialbeanspruchung, dazu der Referenzfall der Mutterverbundproben

Alle Proben mit identischer Blechdicke. Varianten in Art der Belastung, R-Verhältnis, Blechfestigkeit, Typ der Anschweißmuttern.

Im Abbildung 35 sind neben dem Referenzfall für die Versuchsreihen Mutterverbund auch die schon in Abbildung 22 dargestellten und nachfolgend diskutierten Ergebnisse für die Mutterproben eingetragen. Da für den Fall Mutterverbund die Last als Schrägzug über einen vorgespannten Adapter und für den Fall Mutterprobe die Last axial ohne Vorspannung

eingeleitet wird (vgl. Abbildung 9), können die Ergebnisse nicht miteinander verglichen werden. Die systematisch höheren Schwingfestigkeiten ergeben sich hier lediglich aus den unterschiedlichen statischen Systemen.

- Für die Mutterproben unter Axialbelastung hat sich nur ein geringer Einfluss des Lastverhältnisses R ergeben. Die Werte für $R = 0,1$ und $R = 0,5$ fallen in ein Streuband, für den Fall $R = 10$ (entspricht Druck mit $R = 0,1$) ergeben sich leicht erhöhte Lebensdauern.
- Ein signifikanter Einfluss einer erhöhten Festigkeit des Blechmaterials auf die Schwingfestigkeit hat sich nicht ergeben.
- Ein signifikanter Einfluss der Art der Anschweißmutter (3S oder kreisrund) auf die Schwingfestigkeit hat sich ebenfalls nicht ergeben. Hier halten sich (zufällig) mehrere Einflüsse die Waage: lokale Beanspruchung, hochbeanspruchtes Volumen, Unterschiedliche Möglichkeiten der Rissentwicklung (um die kreisrunde Mutter, ins Blech ausgehend von Segment), Summe aus Anrisslebensdauer und Rissfortschritt.

Variante variable Amplituden

Um den Einfluss einer Betriebslastfolge auf die Schwingfestigkeit zu untersuchen, wurde für den Fall der Referenzprobe eine Versuchsreihe mit einer Gaußlastfolge gefahren. Es wurde ein Gaußkollektiv mit einem Umfang von $5 \cdot 10^4$ Schwingspielen entsprechend $1 \cdot 10^5$ Umkehrpunkte gewählt. Bei der zugrundeliegenden Gaußlastfolge handelt es sich um eine „alternierende“ Lastfolge für den Fall $R = 0$, bei der auf jeden oberen Lastumkehrpunkt F_o ein unterer Umkehrpunkt $F_u = 0$ kN folgt. Für den Referenzfall mit $R = 0,1$ wurden die unteren Lastumkehrpunkte zunächst jeweils $F_u = 0,1 F_o$ gesetzt (**Version 1**). Hinsichtlich der Umkehrpunkte ergibt sich damit ausgehend von den oberen Lasten für die Gesamtfolge jeweils das Lastverhältnis $R = 0,1$. Für sehr kleine Oberlasten F_o ergeben sich damit allerdings Unterlasten F_u nahe Null. Führt man eine Rainflowzählung zur Ermittlung der sich ergebenden Lasthysteresen durch, z.B. mit dem HCM-Algorithmus [31], wird spätestens beim zweiten Durchlauf der Rainflowzählung eine Hysterese aus der maximalen Oberlast $F_{o,max}$ und der minimalen Unterlast $F_{u,min} \approx 0$ kN gebildet, für die damit ein Lastverhältnis von $R \approx 0$ gilt. Typischerweise wird die Lastfolge derart korrigiert, dass sich das gewünschte R -Verhältnis für die größte Lasthysterese einstellt: man verschiebt die gesamte Lastfolge um eine Offsetlast F_{off} , sodass nach der Rainflowzählung für das Lastverhältnis $R = F_{u,min}/F_{o,max}$ gilt (**Version 2**). Für die Variante „variable Amplituden“ wurden beide Versionen mit je 2 Versuchen auf dem höchsten Lastniveau $F_a = 0,5$ kN des Referenzfalles gefahren:

- **Version 1:** Referenzprobe MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P1, Lastamplitude $F_a = 0,5$ kN, Schwingweite $\Delta F = 1,0$ kN, $R = 0,1$ für die Umkehrpunkte, zusätzlicher Lastoffset $F_{off} = 0,02$ kN um Zugvorspannung im Prüfaufbau zu gewährleisten.
- **Version 2:** Referenzprobe MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P1, Lastamplitude $F_a = 0,5$ kN, Schwingweite $\Delta F = 1,0$ kN, $R = 0,1$ für die größte Hysterese, Lastoffset $F_{off} = 0,11$ kN, $F_{o,max} = 1,0 + 0,11 = 1,11$ kN, $F_{u,min} \approx 0,0 + 0,11 = 0,11$ kN, $R = 0,11/1,11 = 0,1$.

Anmerkungen zur Versuchsdurchführung:

Die Versuche wurden am IFSW auf einer servohydraulischen Prüfmaschine der Fa. Schenck mit einem Instron 8800 Regler und der zugehörigen Prüfsoftware RS LabSite lastgeregelt gefahren. Für die Betriebslastfolge wurde das Modul ECOR (Electronic Correction) eingesetzt, das mit Soll-Ist-Vergleichen für die Lastumkehrpunkte eine 64x64 Werte umfassende Fehlermatrix erstellt. Die einzelnen Felder der Matrix repräsentieren Von-Nach-Übergänge (von Umkehrpunkt - nach Umkehrpunkt). Die abgespeicherten Fehler werden beim nächsten Anfahren eines Von-Nach-Überganges durch Änderung des Lastsollwertes korrigiert und der Vorgang regelmäßig wiederholt. Das System war bei einer Prüffrequenz von $f = 3,125$ Hz regelstabil und die erreichte, vom Programm ermittelte Regelabweichung blieb kleiner als 0,02 kN.

Eine Betriebslastfolge wird vom Programm ECOR als Fahrsignal (Lastfolge mit Zwischenwerten zwischen den Umkehrpunkten) und nicht als Umkehrpunktfolge interpretiert. Beim Einlesen einer Lastfolgedatei werden Umkehrpunkte identifiziert, wobei ein Filter zum Entfernen von Rauschteilen zum Einsatz kommt. Hierbei wurden die kleinsten Werte der angesetzten Gaußlastfolge eliminiert, sodass am Schluss eine Lastfolge mit 97439 anstelle 100000 Umkehrpunkten gefahren wurde. Für die Schädigungssumme ergibt sich durch den Wegfall der kleinen Lastanteile keine Änderung, da sie praktisch keinen Schädigungsbeitrag leisten. Im Laufe des Versuches werden die Daten der Istwerte mit einem 40-fachen Oversampling abgetastet, d.h. bei einer Prüffrequenz von $f = 3,125$ Hz ergibt sich eine Abtastrate von $f_A = 40 \cdot 3,125 = 125$ Hz.

Leider können die Versuchsdaten auch nur mit genau dieser Frequenz abgespeichert werden. Für das zeilenweise Abspeichern der gesamten Lastfolge mit ca. 50000 Schwingspielen würden sich also $50000/3,125 \cdot 125 = 2,08 \cdot 10^6$ Ergebniszeilen ergeben. Das führt zum Abbruch des Versuchslaufes; es wurde daher entschieden, je Durchlauf der Lastfolge lediglich die letzten 800 Sekunden entsprechend 2500 Schwingspielen und 100000 Ergebniszeilen zu sichern. Die Auswertung von Anriss (8%-Kriterium) und Versagen (3 mm-Kriterium) erfolgte auf Basis dieser Daten. Der Datenbereich enthält eine

maximale Oberlast von $F_o \approx 0,89 \cdot F_{max}$ und eignet sich daher gut für die Ermittlung der vorgenannten Kriterien.

Die Laufzeit der beschriebenen Versuche unter variablen Amplituden betrug bis zum Erreichen des Abschaltkriteriums der Prüfmaschine ca. 4 Tage. Hinsichtlich der schon recht langen Laufzeiten für das gewählte, höchste Lastniveau wurde entschieden, anstelle einer Gassnerlinie den Einfluss der Art des R-Verhältnisses (s.o.) mit 4 Einzelversuchen zu untersuchen.

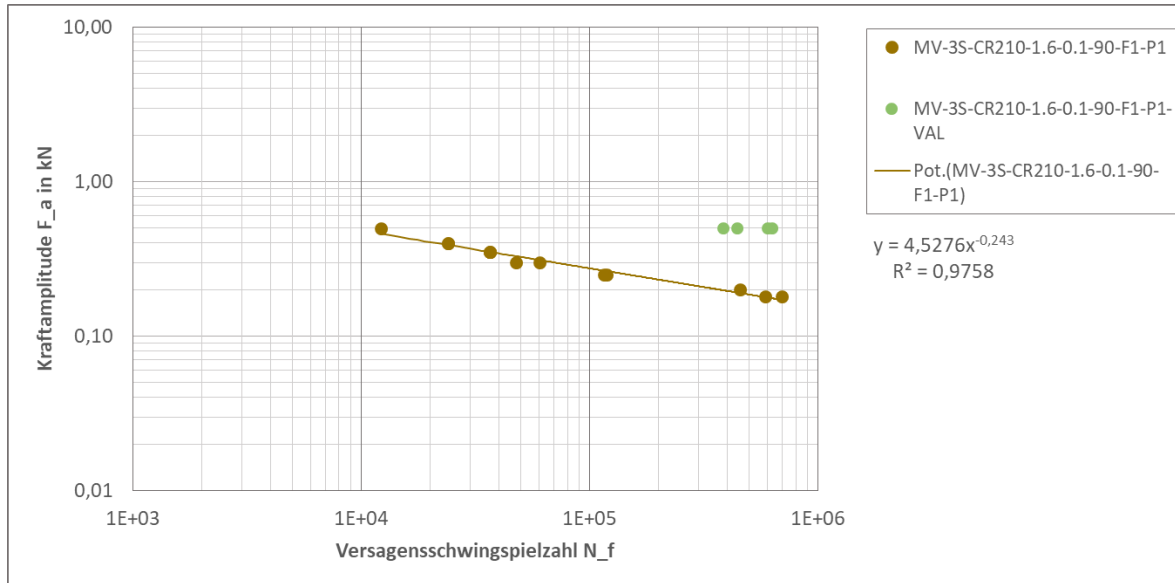


Abbildung 36: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: variable Amplituden, Gaußlastfolge 5E4 (48719 Schwingspiele), 2 Versionen $R = 0,1$

Alle Proben mit identischem Verbindungsmittel 3S, Blechmaterial CR210, Lastrichtung 90° , Vorspannkraft F1 (14 kN). Varianten mit variablen Amplituden, Gaußlastfolge mit Umfang $5 \cdot 10^4$ Schwingspiele, 2 Versionen für $R = 0,1$, $F_{a,max} = 0,50$ kN

- Version 1: $F_u = 0,1 F_o$ nach jedem oberen Umkehrpunkt. Das Versagenskriterium ($u_{max,Durchlauf_1} + 3mm$) wird für die Gaußlastfolge im Mittel nach $N_f \approx 414000$ Schwingspielen erreicht. Für die Einstufenlast $F_a = 0,50$ kN tritt Versagen nach ca. 12000 Schwingspielen auf.
- Version 2: $F_u = 0,1 F_{o,max}$ für alle unteren Umkehrpunkte. Das Versagenskriterium ($u_{max,Durchlauf_1} + 3 mm$) wird für die Gaußlastfolge im Mittel nach $N_f \approx 616000$ Schwingspielen erreicht. Damit liegt die Versagensschwingspielzahl um den Faktor 1,5 höher als für die Version 1. Die Erhöhung der Lebensdauer geht auf den Einfluss der im Vergleich zur Version 1 (V1) um $F_{V2}/F_{V1} = 1,11/1,02 = 1,09$ höheren, selten auftretenden Maximallasten zurück; siehe hierzu die Ausführungen zu Variante „Einmalige Anfangsüberlasten“ und „Anmerkungen zu nichtlinearem Systemverhalten“.

Aus den Ergebnissen der Versuche mit variablen Amplituden werden Schädigungssummen im Vergleich zur Wöhlerlinie der Referenzversuche berechnet. Hierzu wird für die im Versuch gefahrene Gaußlastfolge die Anzahl der geschlossenen Hysterese mittels einer Rainflowzählung mit dem HCM-Algorithmus [31] ermittelt und anschließend die Schädigungssumme basierend auf der Wöhlerlinie des Referenzfalles berechnet. Im Rahmen des HCM-Algorithmus wird die Lastfolge erneut in 100 Klassen eingeklassiert, wobei die Werte auf einen Bereich von 0 bis 100 als ganzzahlige Werte festgelegt sind. Hierdurch wird die ursprüngliche Lastfolge erneut etwas geändert. Eine reine Verschiebung der Lastfolge um einen konstanten Lastwert dürfte keine Änderung der gezählten Hysterese ergeben (die ermittelten Schwingweiten sind unabhängig von der Mittellast). Hinsichtlich der Einklassierung und Umwandlung in ganzzahlige Werte können kleinere numerische Abweichungen auftreten.

Für die Ermittlung der Schädigungssumme mit der Rainflowmethode wird die Lastfolge 2x durchlaufen: beim ersten Durchlauf verbleibt ein Residuum nicht geschlossener Hysterese, welche sich beim zweiten Durchlauf schließen. Insofern sind die Schädigungsanteile aus dem ersten und zweiten (und identisch allen weiteren) Durchlauf unterschiedlich.

Die Schädigungssumme wird unter Ansatz der linearen Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner ermittelt. Die zugrundeliegende Wöhlerlinie des Referenzfalles für den Fall der Versagenschwingungszahlen ist wie folgt definiert:

$$F_a = 4,5276 N_f^{-0,243} \quad (8a)$$

$$N_f = 500,087 F_a^{-1/0,243} \approx 500 F_a^{-4,115} \quad (8b)$$

Tabelle 5: Ergebnisse der Versuche mit Mutterverbund unter variablen Amplituden, Gaußlastfolge 5E4 mit Umfang 97439 Umkehrpunkten bzw. 48719 Schwingspielen

Lfd. Nr.	Version R-Verhältnis	Schädigung Anteil aus Durchlauf 1 D ₁	Schädigung Anteil aus Durchlauf 2 und weitere Durchläufe D ₂	Durchläufe bis D = 1 n _{BI}	Schwingspiele bis D = 1	Schwingspiele experimentell N _f	Schädigungssumme D _{exp}
1	1	7,636E-02	7,647E-02	13,078	637163	442996	0,695
2	1	7,636E-02	7,647E-02	13,078	637163	384481	0,603
3	2	7,610E-02	7,621E-02	13,123	639318	602667	0,943
4	2	7,610E-02	7,621E-02	13,123	639318	629764	0,985

Basierend auf den hier ermittelten Daten wird für die Bemessung auf Betriebslasten empfohlen, die zulässige Schädigungssumme auf den in der IIW-Richtlinie [5] empfohlenen Wert $D = 0,5$ zu begrenzen und die Wöhlerlinie ohne Ansatz einer Dauer- bzw. Langzeitfestigkeit zu verlängern (Miner-elementar).

3.3.4 Zusammenfassung

Insgesamt ist das in den Wöhlerdiagrammen Abbildung 22, Abbildung 23, Abbildung 27 Abbildung 28 erkennbare Streuband der Versuchsreihen wegen der vielen Varianten recht groß. Für die Ermittlung von Nennspannungswöhlerlinien müsste man auf die einzelnen Varianten eingehen und mehrere Wöhlerlinien anbieten. Diese wären aber dennoch nicht verallgemeinerungsfähig, da ihre Gültigkeit für weitere Varianten nicht geklärt wäre. Aus dem recht großen Streuband ist ersichtlich, dass für eine allgemeine Lebensdauerbewertung, welche bspw. unterschiedliche Verbindungselemente oder Lastfälle beinhaltet, die Ableitung von Struktur- und Kerbspannungswöhlerlinien von Nutzen ist.

4 Finite Element Modelle (FE-Modelle), Strukturspannung

4.1 Bolzen- und Mutterverbindungen, Axialbelastung

Für die Entwicklung einer Referenz-Wöhlerlinie, zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Stahl- Verbindungselemente mit Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Strukturspannungskonzepts, wurden Finite-Elemente-Modell (FE-Modelle) mit linear elastischem Werkstoffverhalten für die Bolzen- und Mutterproben mit der Software Abaqus 2018 aufgebaut, Abbildung 37 und Abbildung 38. Dabei wurde für die Verbindungselemente und die Bleche Stahl mit einem E-Modul von $E = 210$ GPa und einer Poissonzahl von $\nu = 0.3$ verwendet. Nach der Vernetzungsvorschrift wird das Blech im versagenskritischen Bereich jeweils mit 16 Schalenelementen über 360° (Elementtyp: S4R) und 3 Elementen in radialer Richtung mit der Elementlänge von $l_{rad} = 2$ mm vernetzt. Die Verbindungselemente werden mittels beam-Elemente (Elementtyp: B31) abgebildet, wobei diese in Anlehnung an die reale Geometrie angepasst werden. Die Anbindung von Schalenelementen zu beam-Elemente erfolgt mittels starrer Elemente (Kinematic coupling) in Anlehnung an die reale lokale Schweißgeometrie.

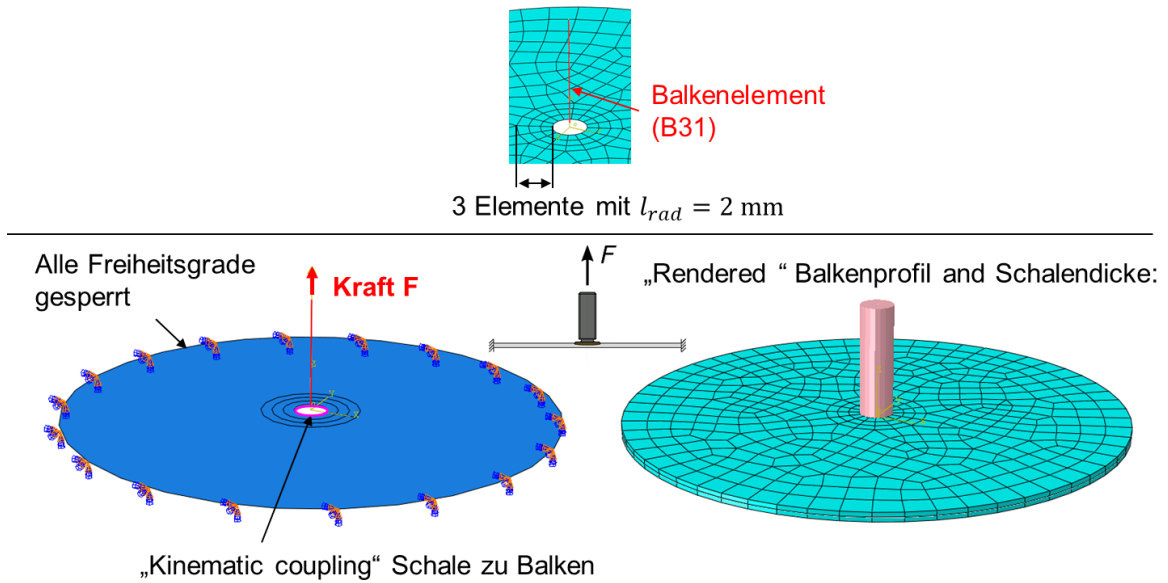


Abbildung 37: FE-Modell Bolzenproben, Axialzug

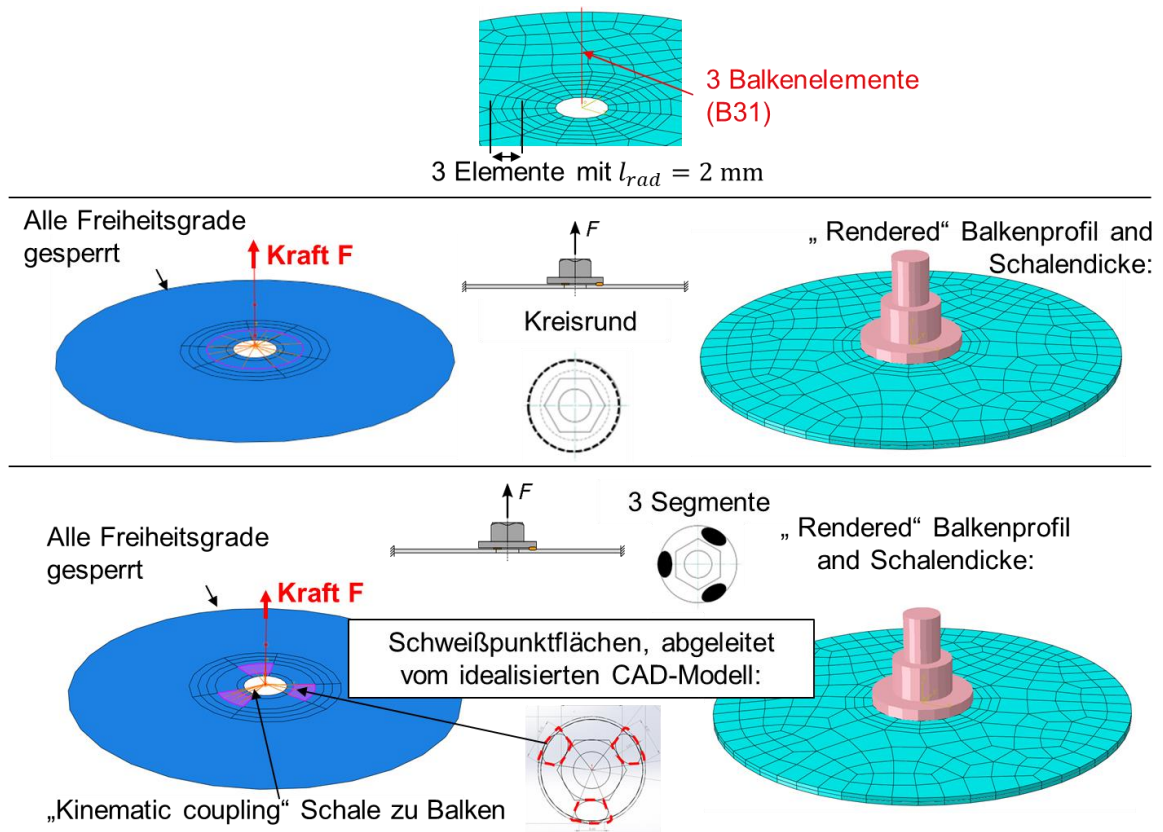


Abbildung 38: FE-Modelle der Mutterproben mit kreisrunder Schweißnaht und Punktschweißungen mit drei Segmenten, Axialzug

4.2 Bolzen- und Mutterverbindungen, Schrägzugbelastung

Für die Abbildung der Schrägzugbelastungen wird zusätzlich der Adapter als Volumenmodell, bestehend aus Tetraeder-Elementen (Elementtyp: C3D10) und Hexaeder-Elementen (Elementtyp: C3D20), mit einer Elementkantenlänge von $l_{el} = 1.6 \text{ mm}$

implementiert, Abbildung 39. Dazu wird der Kontakt zwischen Adapter und Schalenelemente mittels der Kontaktdefinition „Surface to surface contact“ (Tangential behavior: Penalty, isotropic, friction coeff of 0.1, normal behavior: „hard“ contact) simuliert. Der Kräfteinleitungspunkt wird mittels starrer Elemente („Kinematic coupling“) mit dem Adapter verbunden. Diese werden ebenfalls für die Verbindung zwischen Mutterauflage bzw. Schraubenkopfauflage des Adapters und beam-Element verwendet.

Im ersten Berechnungsschritt (Step 1) werden die Randbedingungen modellieren und die Vorspannkraft F_P aufgebracht („Apply force“). Im zweiten Berechnungsschritt (Step 2) werden die Schraube bzw. der Bolzen in ihrer aktuellen Länge fixiert („Fix at current length“) und die Kraftamplitude F_a aufgebracht.

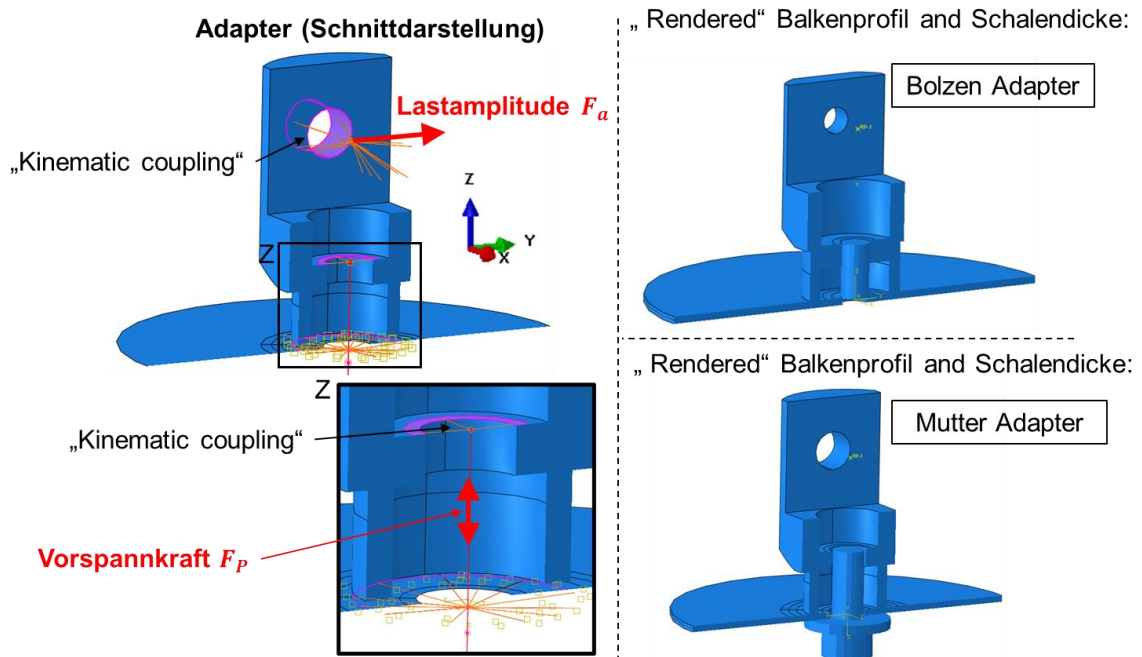


Abbildung 39: FE-Modelle Bolzen- und Mutterproben, Schrägzug

4.3 Ermittlung der Strukturspannung (post-processing)

Die Ermittlung der Strukturspannung erfolgt in Anlehnung an das FESPOW-Konzept [8]. Hierzu wird ein zylindrisches Koordinatensystem (CSYS) in der Mittelachse des Verbindungselements erstellt, Abbildung 40. Anschließend werden die Ergebnisse auf dieses Koordinatensystem transformiert und die maximalen Element-Radialspannungen σ_{rad} in zweiter Elementreihe am Integrationspunkt ausgelesen, Abbildung 40. Die Ermittlung der Element-Radialspannungsamplitude $\sigma_{rad,a}$ erfolgt anschließend nach:

$$\sigma_{rad,a} = \sigma_{rad,Step2} - \sigma_{rad,Step1} \quad (9)$$

Anschließend wird die Radialspannungsamplitude $\sigma_{rad,a}$ noch mit einem Blechdickenfaktor nach [8] korrigiert, welcher wie folgt bestimmt wird:

$$K = 0.6 \cdot \sqrt{t} \quad (10)$$

Die Strukturspannungsamplitude $\sigma_{S,a}$ ergibt sich somit zu:

$$\sigma_{S,a} = K \cdot \sigma_{rad,a} \quad (11)$$

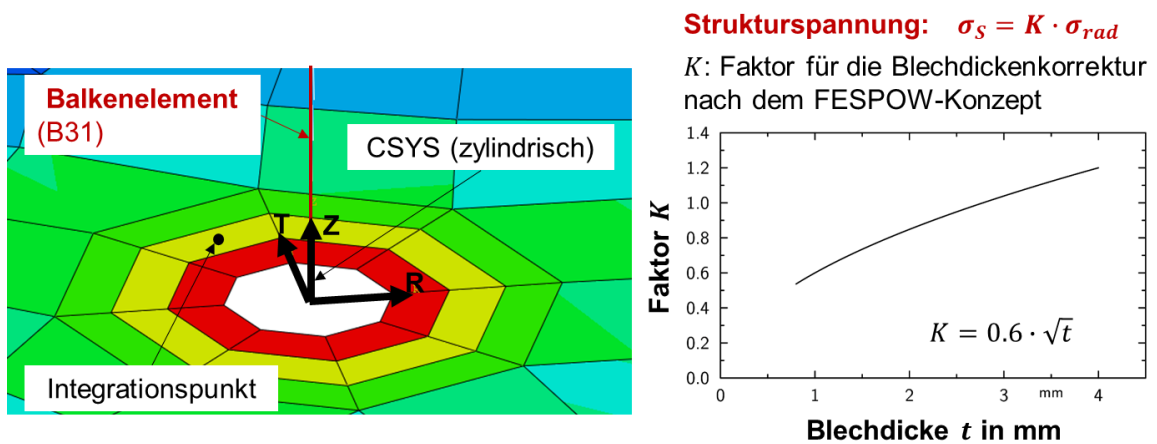


Abbildung 40: Ermittlung der Strukturspannung an Anlehnung an FESPOW-Konzept [8]

5 Schwingfestigkeitsbewertung, Strukturspannung

Abbildung 41 zeigt die Strukturspannungsamplituden $\sigma_{S,a}$ aufgetragen über den Versagensschwingspielzahlen N_f , wobei alle Simulationen mit Berücksichtigung der jeweiligen Vorspannkraft F_p durchgeführt wurden. Es wurde bewusst keine zusätzliche Mittelspannungstransformation durchgeführt, da bei der Analyse der Schwingfestigkeitsergebnisse kein nennenswerter Einfluss durch die untersuchten Lastverhältnisse R_F auf die Schwingfestigkeit festgestellt werden konnte.

Die beiden Proben B-A_210-16_90 und B-A_210-08_90 weisen im direkten Vergleich mit den restlichen Proben ca. um den Faktor 2 niedrigere zyklische Beanspruchbarkeiten auf. Dies ist unter anderem auf den in Kapitel 3.3.2 erwähnten frühzeitigen Vorspannkraftverlust zurückzuführen, welcher bei den hier verwendeten Versuchsaufbau mittels Adapter einen relevanten negativen Einfluss auf die Schwingfestigkeit zeigt. Aus diesem Grund wurden für die Erstellung der Referenz-Wöhlerlinie, zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Stahl- Verbindungselemente mit Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Strukturspannungskonzept, die Proben B-A_210-16_90 und B-A_210-08_90 ohne bzw. nur mit einer sehr geringen Vorspannkraft von $F_p \leq 10$ N simuliert und ausgewertet. Da die Auswertung ohne Berücksichtigung der Vorspannkraft F_p hier zu einer konservativeren Bewertung führt, wird die Vorgehensweise insbesondere für eine

industrielle Anwendung empfohlen. Dies gilt insbesondere für den Fall, wenn Plastifizierungen oder Vorspannkraftverluste für die geplante Lebensdauer nicht ausgeschlossen werden können.

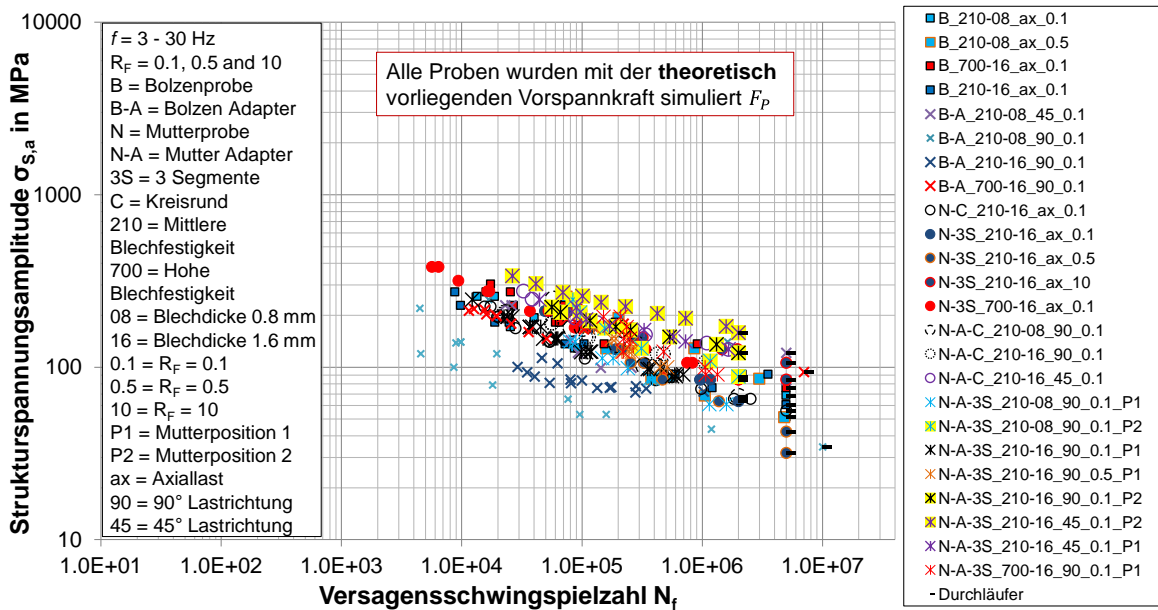


Abbildung 41: Strukturspannungen $\sigma_{s,a}$ aufgetragen über der Versagensschwingspielzahlen N_f

Die Referenz-Wöhlerlinien in diesem Kapitel, mit Bezug auf die Versagensschwingspielzahlen N_f und Anrisschwingspielzahlen $N_{A(k_{cyc}=\Delta 8\%)}$, wurden nach der Maximum-Likelihood-Methode [32] ausgewerteten. Der Abknickpunkt der Wöhlerlinien wurde im Vergleich mit der Literatur, z.B. [5], [33], bei $N = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen festgelegt. Die Neigung nach dem Abknickpunkt wird nach [34] mit $k^* = 22$ weitergeführt.

5.1 Ohne Mittelung der Neigung einzelner Versuchsreihen

Die resultierenden Neigungen k der Referenz-Wöhlerlinien ergeben sich aus der statistischen Auswertung der betrachteten Versuchspunkte. Demnach wurde keine Mittelung anhand der resultierenden Neigungen k der einzeln ausgewerteten Versuchsreihen durchgeführt. So ergeben sich die folgenden Parameter für $R_F = 0,1$ zu:

Versagensschwingspielzahlen N_f (Abbildung 42):

Neigung im Zeitfestigkeitsbereich, k :	3,5
Neigung nach dem Abknickpunkt nach [34], k^* :	22 (vorgegeben)
Schwingspielzahl am Abknickpunkt nach [34], N_k :	$1 \cdot 10^7$ (vorgegeben)
Strukturspannungsamplitude am Abknickpunkt, $\sigma_{s,a,PS=50\%,N_k}$:	46 MPa
Strukturspannungsamplitude am Abknickpunkt, $\sigma_{s,a,PS=97,7\%,N_k}$:	25 MPa
Streuung in Spannungsrichtung, T_s :	1:2.1

Anrisschwingspielzahlen $N_{A(k_{cyc}=\Delta 8\%)}$ (Abbildung 43):

Neigung im Zeitfestigkeitsbereich, k :	3,3
Neigung nach dem Abknickpunkt nach [34], k^* :	22 (vorgegeben)
Schwingspielzahl am Abknickpunkt nach [34], N_k :	$1 \cdot 10^7$ (vorgegeben)
Strukturspannungsamplitude am Abknickpunkt, $\sigma_{S,a,PS=50\%,N_k}$:	31 MPa
Strukturspannungsamplitude am Abknickpunkt, $\sigma_{S,a,PS=97,7\%,N_k}$:	15 MPa
Streuung in Spannungsrichtung, T_s :	1:2.5

Zur praktischen Anwendung wird die Referenz-Wöhlerlinie bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit $P_S = 97,7\%$ empfohlen. In der Literatur sind Streuungen von Referenz-Wöhlerlinien von Schweißverbindungen zu finden, die einen typischen Bereich von $T_S = 1:1.7 - 1:2.03$ liegen, [18]. Damit liegen die Streuungen der Referenz-Wöhlerlinien mit $T_S = 1:2.1$ (Bruch) und $T_S = 1:2.5$ (Anriss) leicht über diesem, jedoch noch in einem akzeptablen Bereich. Daher wird die wird die Schwingfestigkeitsbewertung als gut und zielführend bewertet.

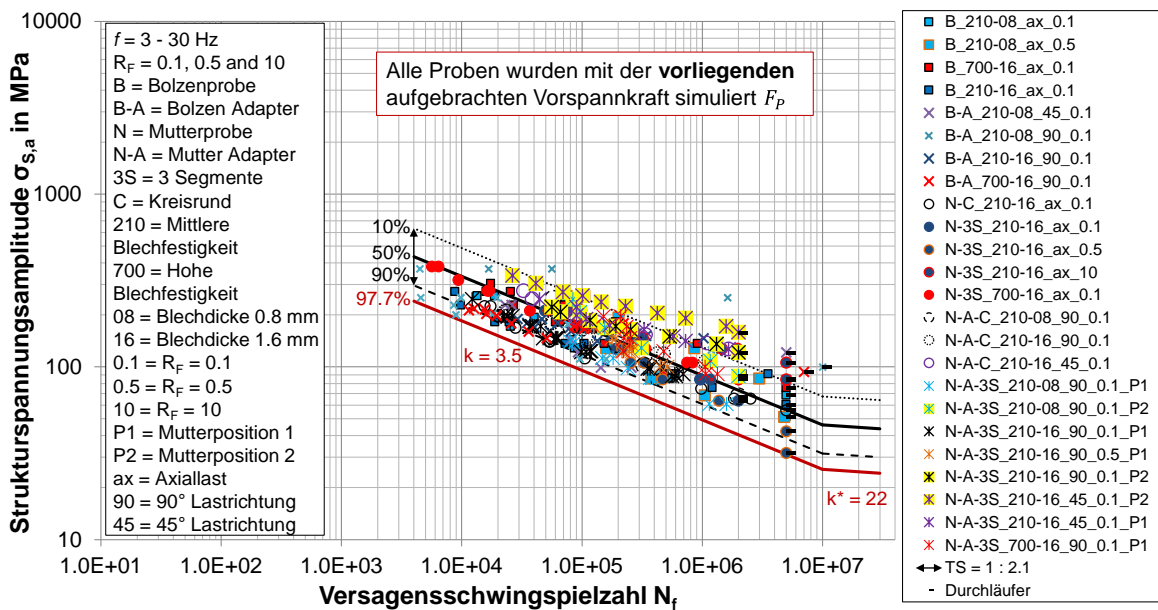


Abbildung 42: Referenz-Wöhlerlinie ohne Mittelung der Neigung, zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Stahl- Verbindungselemente mit Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Strukturspannungskonzepts, Versagensschwingspielzahlen N_f

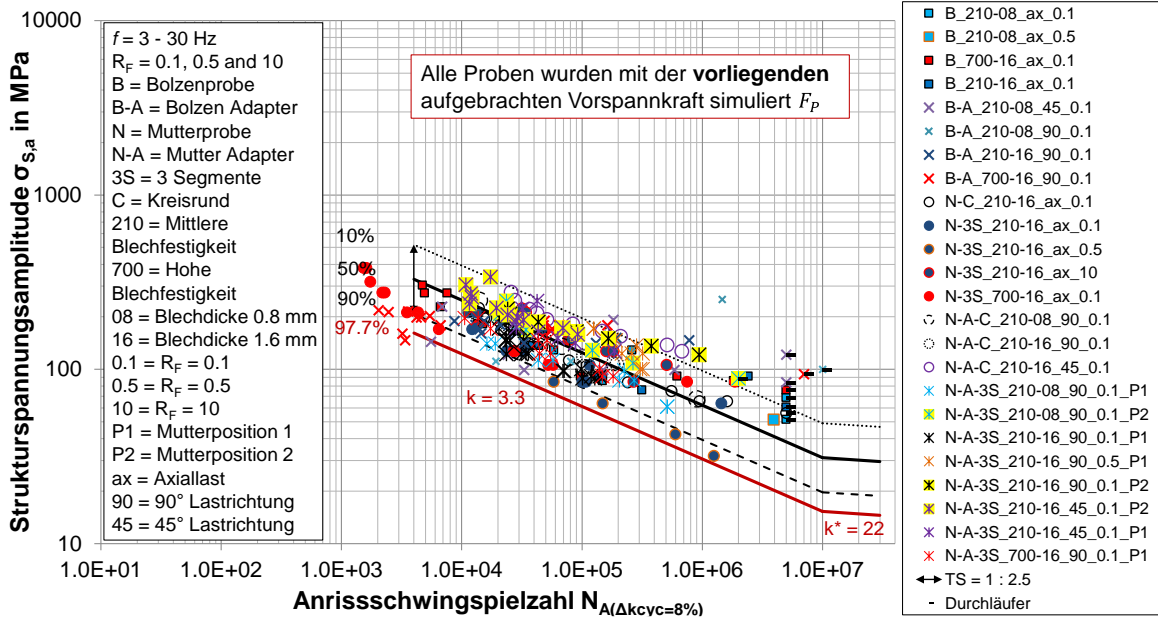


Abbildung 43: Referenz-Wöhlerlinie ohne Mittelung der Neigung, zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Stahl- Verbindungselemente mit Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Strukturspannungskonzepts, Anrisschwingspielzahlen $N_{A(kcy=8\%)}$

Zur vollständigkeitshalber wurden zudem Referenz-Wöhlerlinien (N_f und $N_{A(kcy=8\%)}$) erstellt, welche jeweils nur Bolzen- oder Mutterproben beinhalten, Abbildung 44 bis Abbildung 47. Im Vergleich mit den Referenz-Wöhlerlinien aus Abbildung 42 und Abbildung 43, bleiben die Streuspannen T_S im Falle der Bolzenproben nahezu unverändert, Abbildung 44 und Abbildung 45. Dagegen lässt sich bei den Mutterproben, mit Bezug auf die Anrisschwingspielzahlen $N_{A(kcy=8\%)}$, die Streuspannen auf $T_S = 1:2.2$ geringfügig verringern, Abbildung 47.

Bei dem direkten Vergleich zwischen den Referenz-Wöhlerlinien von Bolzen (Abbildung 44 und Abbildung 45) und Mutterproben (Abbildung 46 und Abbildung 47) weisen die Referenz-Wöhlerlinien der Bolzenproben flachere Neigungen von $k = 4.0$ (N_f) und $k = 4.8$ ($N_{A(kcy=8\%)}$) auf.

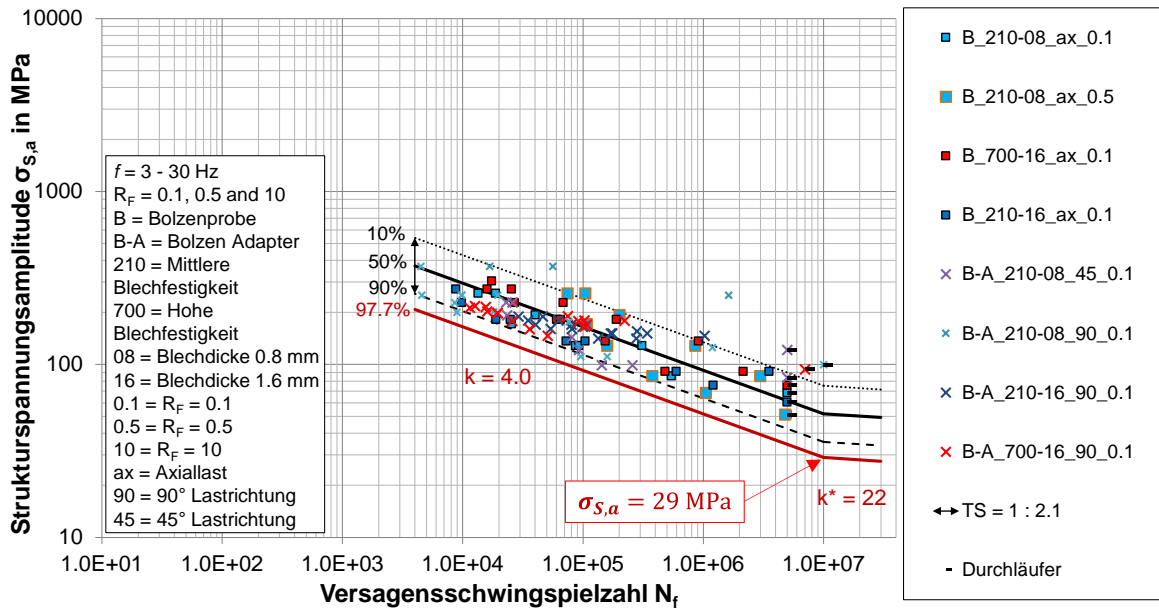


Abbildung 44: Referenz-Wöhlerlinie (Bolzenproben) ohne Mittelung der Neigung, Versagungsschwingspielzahlen N_f

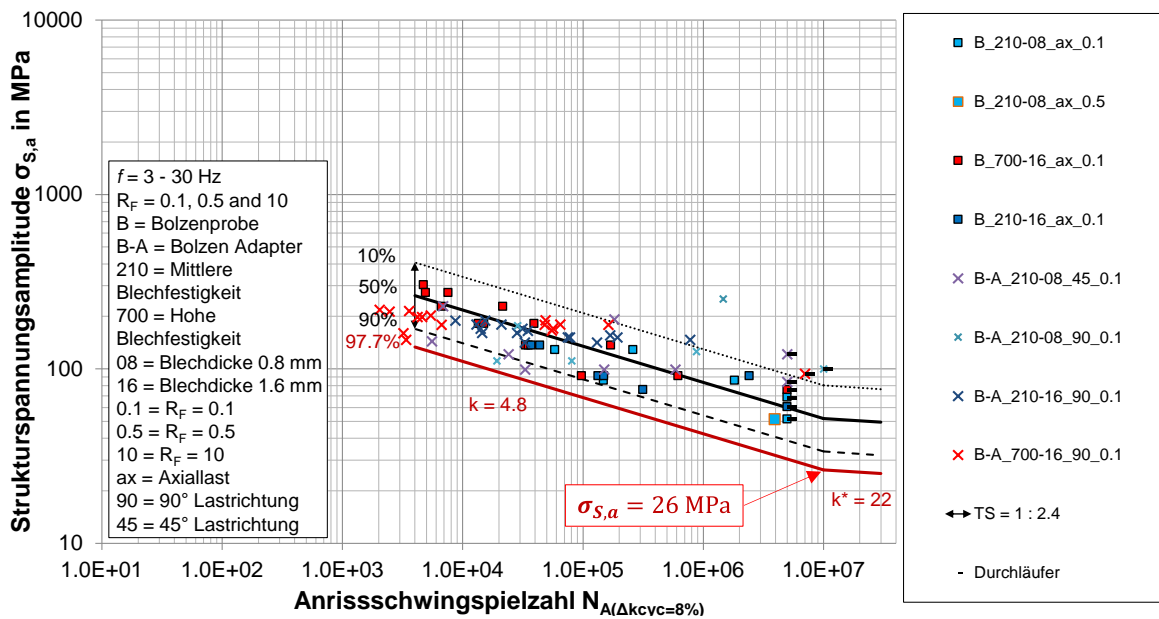


Abbildung 45: Referenz-Wöhlerlinie (Bolzenproben) ohne Mittelung der Neigung, Anrisschwingspielzahlen $N_{A(k_{cyc}=\Delta 8\%)}$

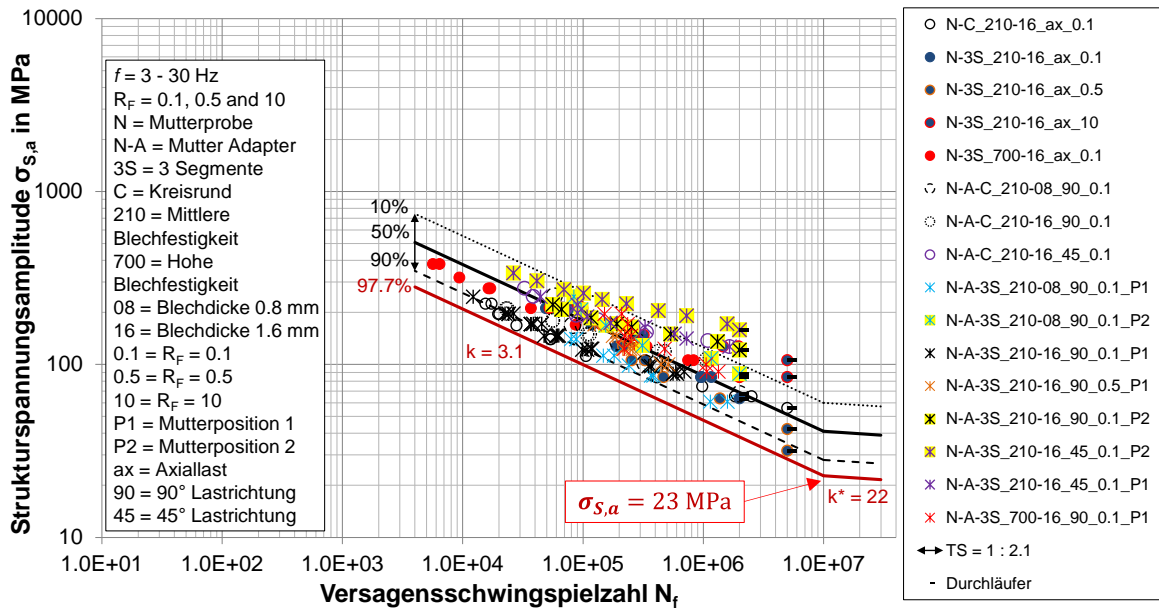


Abbildung 46: Referenz-Wöhlerlinie (Mutterproben) ohne Mittelung der Neigung, Versagungsschwingenzahlen N_f

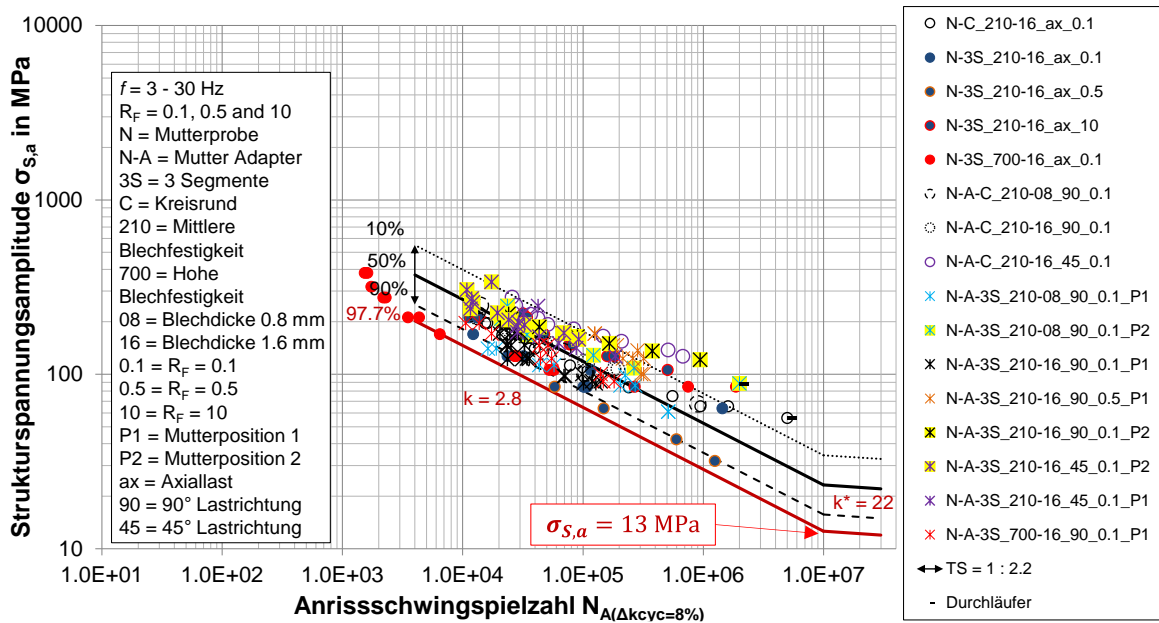


Abbildung 47: Referenz-Wöhlerlinie (Mutterproben) ohne Mittelung der Neigung, Anrisschwingenzahlen $N_{A(kvc=\Delta 8\%)}$

5.2 Mit Mittelung der Neigung einzelner Versuchsreihen

Für die Ermittlung der Neigung k der Referenz-Wöhlerlinien, wurde eine gewichtete Mittelung, bezogen auf die Anzahl an Versuchen und die resultierenden Streuspannen T_S , der einzeln ausgewerteten Versuchsreihen durchgeführt. So ergeben sich die folgenden Parameter für $R_F = 0,1$ zu:

Versagensschwingspielzahlen N_f (Abbildung 48):

Neigung im Zeitfestigkeitsbereich, k :	4,4
Neigung nach dem Abknickpunkt nach [34], k^* :	22 (vorgegeben)
Schwingspielzahl am Abknickpunkt nach [34], N_k :	$1 \cdot 10^7$ (vorgegeben)
Strukturspannungsamplitude am Abknickpunkt, $\sigma_{S,a,PS=50\%,N_k}$:	59 MPa
Strukturspannungsamplitude am Abknickpunkt, $\sigma_{S,a,PS=97,7\%,N_k}$:	35 MPa
Streuung in Spannungsrichtung, T_s :	1:1.9

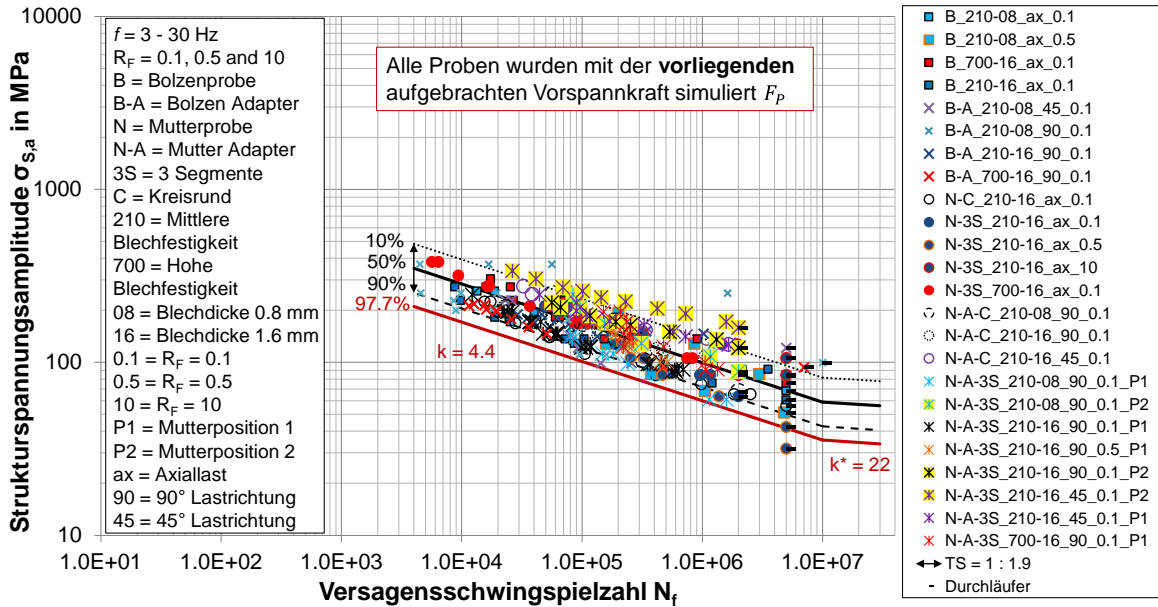


Abbildung 48: Referenz-Wöhlerlinie mit Mittelung der Neigung, zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Stahl- Verbindungselemente mit Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Strukturspannungskonzepts, Versagensschwingspielzahlen N_f

Versagensschwingspielzahlen N_f (Abbildung 49):

Neigung im Zeitfestigkeitsbereich, k :	4,5
Neigung nach dem Abknickpunkt nach [34], k^* :	22 (vorgegeben)
Schwingspielzahl am Abknickpunkt nach [34], N_k :	$1 \cdot 10^7$ (vorgegeben)
Strukturspannungsamplitude am Abknickpunkt, $\sigma_{S,a,PS=50\%,N_k}$:	46 MPa
Strukturspannungsamplitude am Abknickpunkt, $\sigma_{S,a,PS=97,7\%,N_k}$:	26 MPa
Streuung in Spannungsrichtung, T_s :	1:2.0

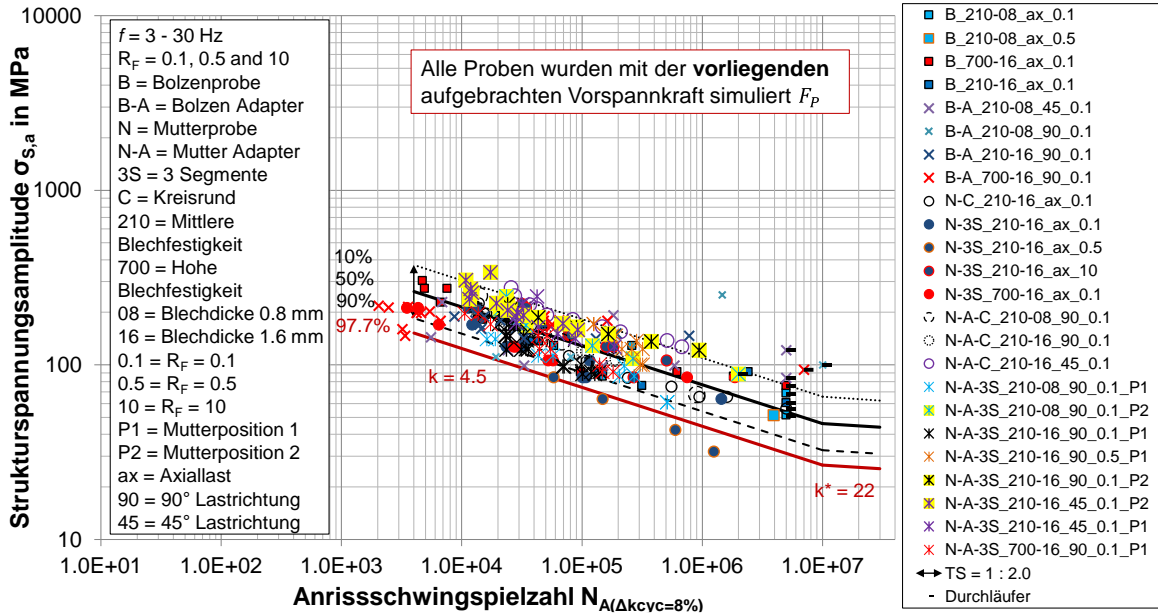


Abbildung 49: Referenz-Wöhlerlinie mit Mittelung der Neigung, zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Stahl-Verbindungselemente mit Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Strukturspannungskonzepts, Anrisschwingspielzahlen $N_{A(kcyC=\Delta 8\%)}$

Auch in diesem Kapitel werden zusätzlich Referenz-Wöhlerlinien (N_f und $N_{A(kcyC=\Delta 8\%)}$) erstellt, welche jeweils nur Bolzen- oder Mutterproben berücksichtigen, Abbildung 50 bis Abbildung 53. Im Vergleich mit den Referenz-Wöhlerlinien aus Abbildung 48 und Abbildung 49, bleiben die Streuspannen T_S im Falle der Bolzen- und Mutterproben nahezu unverändert.

Bei dem direkten Vergleich zwischen den Referenz-Wöhlerlinien von Bolzen (Abbildung 50 und Abbildung 51) und Mutterproben (Abbildung 52 und Abbildung 53) weisen die Referenz-Wöhlerlinien der Bolzenproben flachere Neigungen von $k = 5.0$ (N_f) und $k = 6.4$ ($N_{A(kcyC=\Delta 8\%)}$) auf.

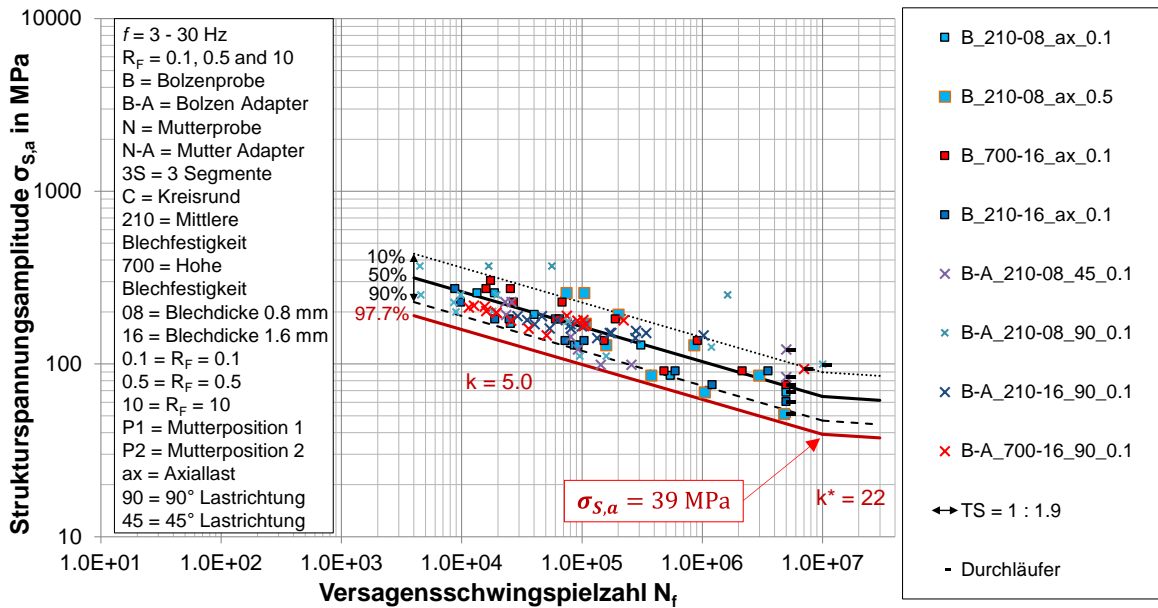


Abbildung 50: Referenz-Wöhlerlinie (Bolzenproben) mit Mittelung der Neigung, Versagenschwingenspielfzahlen N_f

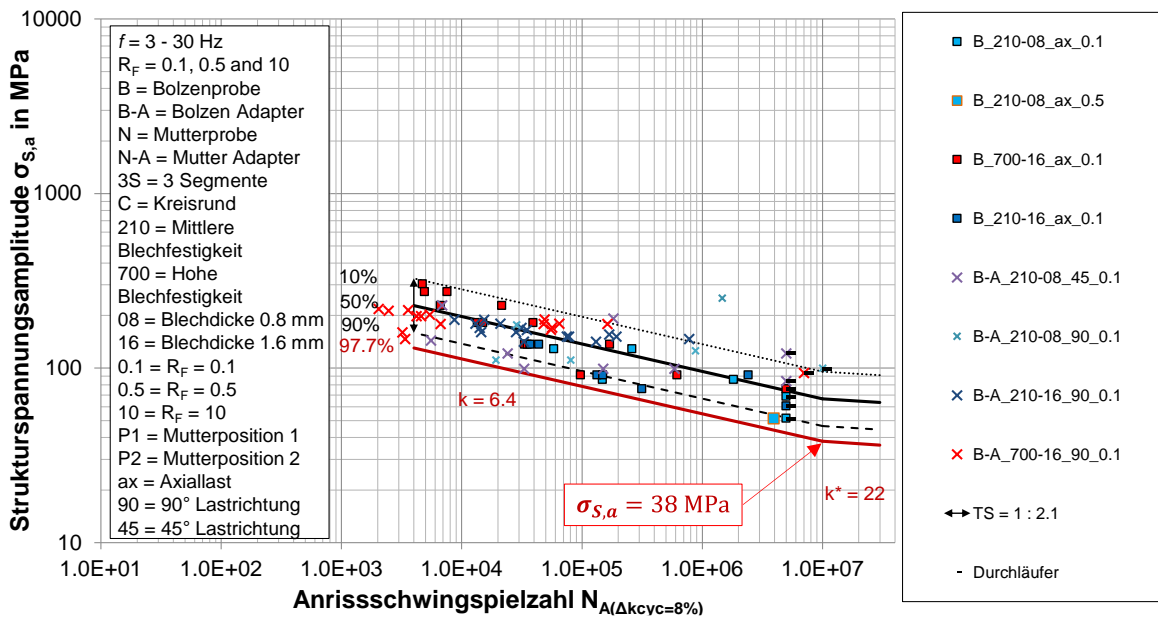


Abbildung 51: Referenz-Wöhlerlinie (Bolzenproben) mit Mittelung der Neigung, Anrisschwingenspielfzahlen $N_{A(k_{cyc}=\Delta 8\%)}$

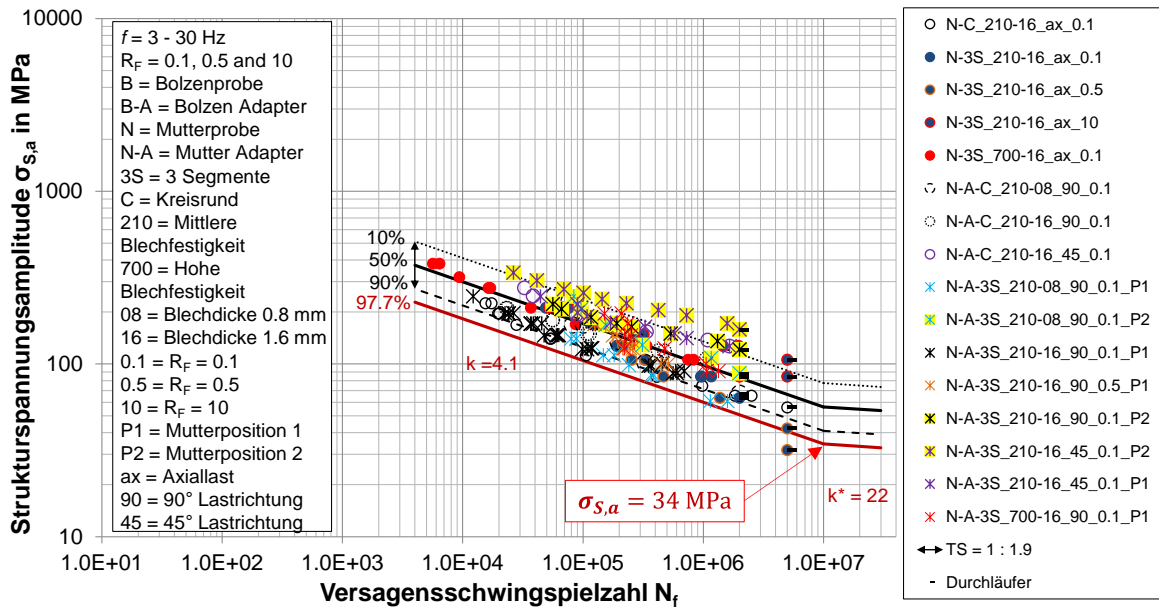


Abbildung 52: Referenz-Wöhlerlinie (Mutterproben) mit Mittelung der Neigung, Versagensschwingspielzahlen N_f

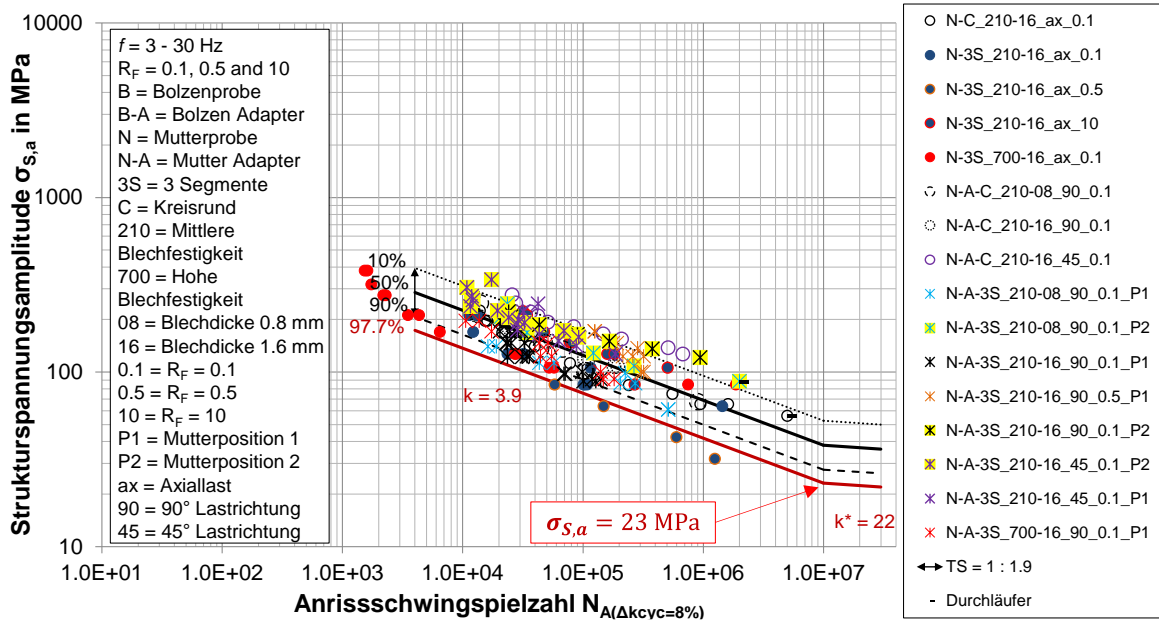


Abbildung 53: Referenz-Wöhlerlinie (Mutterproben) mit Mittelung der Neigung, Anrisschwingspielzahlen $N_{A(kcyc=8\%)}$

6 Schwingfestigkeitsbewertung, Kerbspannungskonzept

6.1 Finite-Elemente-Modelle

Zur Bewertung der Schwingfestigkeitsversuche mit dem Kerbspannungskonzept werden die im Kerbgrund der Schweißnaht auftretenden örtlichen linear-elastischen Spannungen mittels linear-elastischer Finite-Elemente-Analysen (FEA) bestimmt. Die Modellierung der Schweißnahtgeometrie erfolgte auf Basis von CT-Scans für eine realitätsnahe

Approximation, wobei im Falle der Punktschweißungen Ellipsoide zur Abbildung dieser genutzt werden. Im Folgenden wird nach [12] und [13] für die vorliegende Feinblechverbindung als Ersatzradius für den tatsächlichen Radius an den Nahtübergangskerben $r_{ref} = 0,05 \text{ mm}$ für alle Varianten der Mutter- und Bolzenproben gewählt. Für die Kerbspannung wird nach [15] die Vergleichsspannung nach von Mises ausgewertet. Für alle untersuchten Modelle (Bolzen- und Mutterschweißverbindungen) wurde ein linear-elastisches Werkstoffverhalten mit dem Elastizitätsmodul $E = 210 \text{ GPa}$ und der Querkontraktionszahl $\nu = 0,3$ vorgegeben.

6.1.1 Bolzenprobe und -verbund

Die Bolzenproben unter Axialbeanspruchung wurden zur Ermittlung der Kerbspannung in Abaqus 2018 mittels zweidimensionaler rotationssymmetrischer Modelle abgebildet, siehe Abbildung 54 a). Die Vernetzung erfolgte mittels Elementen Typs *CAX8R* bzw. *CAX6* und die Elementanzahl im versagenskritischen Bereich in Anlehnung an die Vernetzungsvorschrift gewählt, wobei eine Verfeinerung mittels Konvergenzstudie vorgenommen wurde, falls nötig. Als Randbedingungen wurde am Bolzen eine axiale Beanspruchung aufgebracht und die Verschiebung des Blechs entsprechend der realen Einspannung des Versuchsaufbaus fixiert. Die Auswertung der maximal auftretenden Kerbspannung erfolgt am Ersatzradius der Nahtübergangskerbe zwischen Bolzen und Blech, siehe Abbildung 54 b).

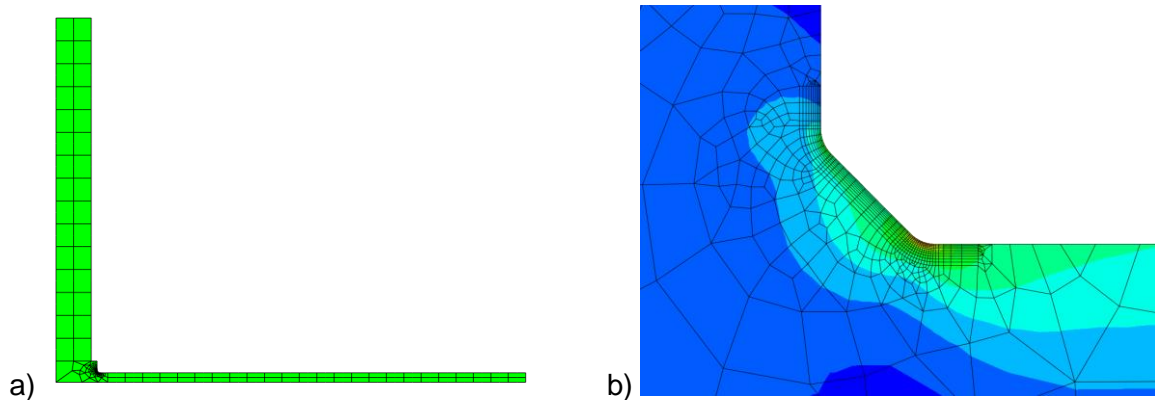


Abbildung 54: Beispiel eines FEM-Modells der axial beanspruchten Bolzenprobe: a) Gesamtansicht des 2D-Modells, b) Detailansicht der Nahtübergangskerbe mit Stelle der höchsten Kerbspannung

Zur Untersuchung der schrägzugbelasteten Bolzenverbunde unter Vorspannung wurden dreidimensionale symmetrische Halbmodelle genutzt, siehe Abbildung 55 a). Die Vernetzung erfolgte mittels Elementen Typs *C3D8R* bzw. *C3D4* mit reduzierter Integration und die Elementanzahl im Kerbgrund wurde ebenfalls entsprechend der Vernetzungsvorschrift gewählt und falls nötig verfeinert. Der Kontakt zwischen Adapter und Blech wurde mittels der Kontaktdefinition „Surface to surface“ (*Tangential behavior: Penalty* mit dem Reibungskoeffizienten $\mu = 0,2$ und *Normal behavior: „Hard“ contact*) simuliert. Die

Vorspannkraft wurde im ersten Berechnungsschritt über eine *Bolt Load* aufgebracht und für den zweiten Schritt – der Schrägzugbelastung in 45°- oder 90°-Richtung – gehalten (*Bolt load Method*: „Fix at current length“). Die Auswertung der maximalen Kerbspannung erfolgt am Ersatzradius der Nahtübergangskerbe zwischen Bolzen und Blech, siehe Abbildung 55 b).

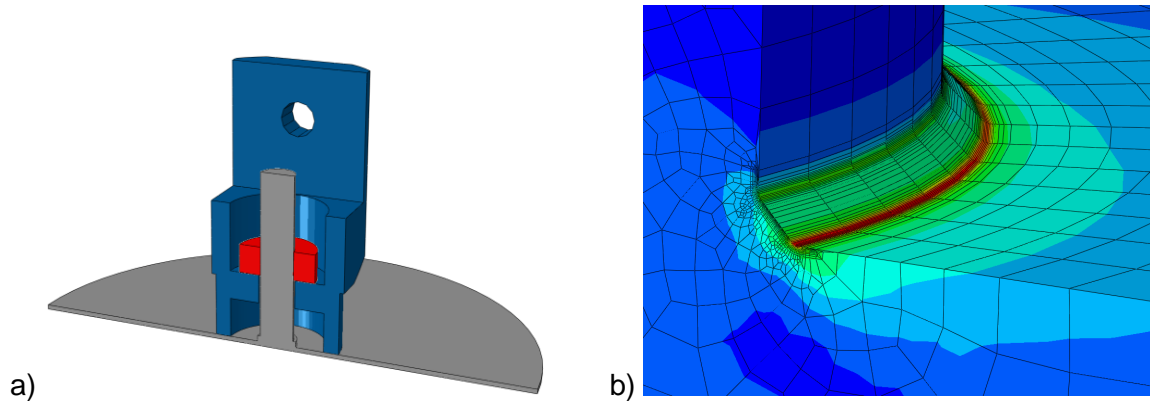


Abbildung 55: Beispiel eines FEM-Modells des schrägzugbelasteten Bolzenverbands: a) Gesamtansicht des Halbmodells, b) Detailansicht der Nahtübergangskerbe mit Stelle der höchsten Kerbspannung

6.1.2 Mutterprobe und -verbund

Für die FE-Modelle der Mutterprobe und des -verbands mit dreisegmentigen Punktschweißungen wurde die Schweißnahtgeometrie durch ein transformiertes Ellipsoid angenähert, Abbildung 56. Die Parameter der Halbachsen wurden durch Minimierung der algebraischen Abstände auf Basis von CT-Scans der Schweißungen bestimmt. Hierbei wurden Ellipsoide mit den Halbachsen $a = 3,5$ mm, $b = 2,4$ mm und $c = 1,5$ mm modelliert.

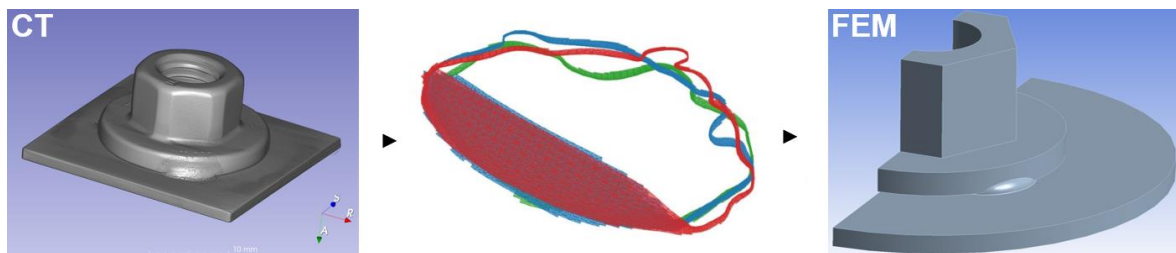


Abbildung 56: Modellierung der Schweißnaht auf Basis der CT-Scans, Extraktion der Schweißnaht und Approximation durch Ellipsoid für FE-Analysen

Die Mutterproben unter Axialbeanspruchung wurden zur Ermittlung der Kerbspannung in Abaqus 2018 mittels zweidimensionaler rotationssymmetrischer Modelle abgebildet, siehe Abbildung 57 a). Die Vernetzung erfolgte mittels Elementen Typs *CAX8R* und die Elementanzahl im versagenskritischen Bereich wurde in Anlehnung an die Vernetzungsvorschrift gewählt, wobei eine Verfeinerung mittels Konvergenzstudie vorgenommen wurde, falls nötig. Die Auswertung der maximalen Kerbspannung erfolgt für

die kreisrunde Schweißnaht sowie für die dreisegmentigen Punktschweißungen am Ersatzradius der Nahtübergangskerbe zwischen Mutter und Blech, siehe Abbildung 57 b)

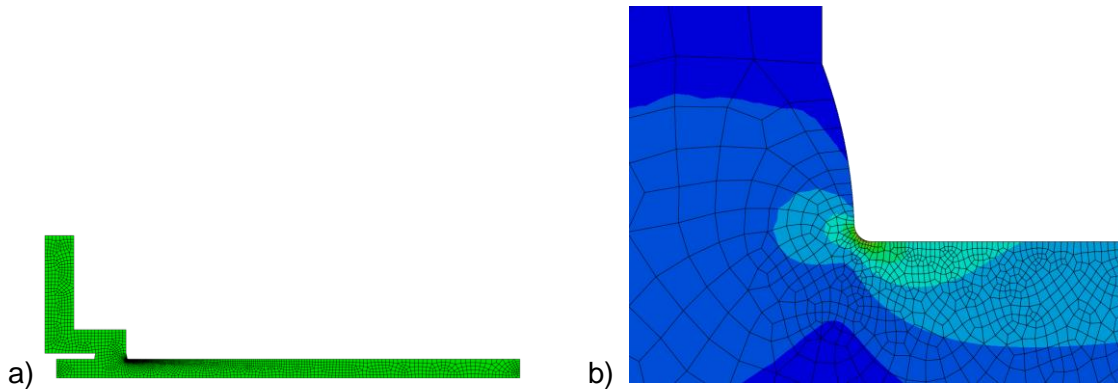


Abbildung 57: Beispiel eines FEM-Modells der axial beanspruchten Mutterprobe: a) Gesamtansicht des 2D-Modells, b) Detailansicht der Nahtübergangskerbe mit Stelle der höchsten Kerbspannung

Zur Untersuchung der Mutterverbunde unter Schrägzugbelastung und Vorspannung wurde ANSYS Mechanical 2021 R2 genutzt und die jeweiligen Einstellungen analog zum Vorgehen in Abaqus 2018 bei den Bolzenverbunden vorgenommen. Die Modellierung erfolgte als dreidimensionales symmetrisches Halbmodell, siehe Abbildung 58 a), und die Vernetzung über Elemente des Typs *SOLID186* bzw. *SOLID187* für Adapter und Blech sowie *CONTA174* für die Kontaktformulierung. Hierfür wurde zwischen Blech und Adapter ein reibungsbehafteter Kontakt (Reibungskoeffizient $\mu = 0,2$) vorgegeben. Die Vorspannkraft wurde ebenfalls im ersten Berechnungsschritt aufgebracht und für den zweiten Schritt – der Schrägzugbelastung – gehalten. Die Auswertung der maximalen Kerbspannung erfolgt für die kreisrunde Schweißnaht sowie für die dreisegmentigen Punktschweißungen am Ersatzradius der Nahtübergangskerbe zwischen Mutter und Blech, siehe Abbildung 58 b).

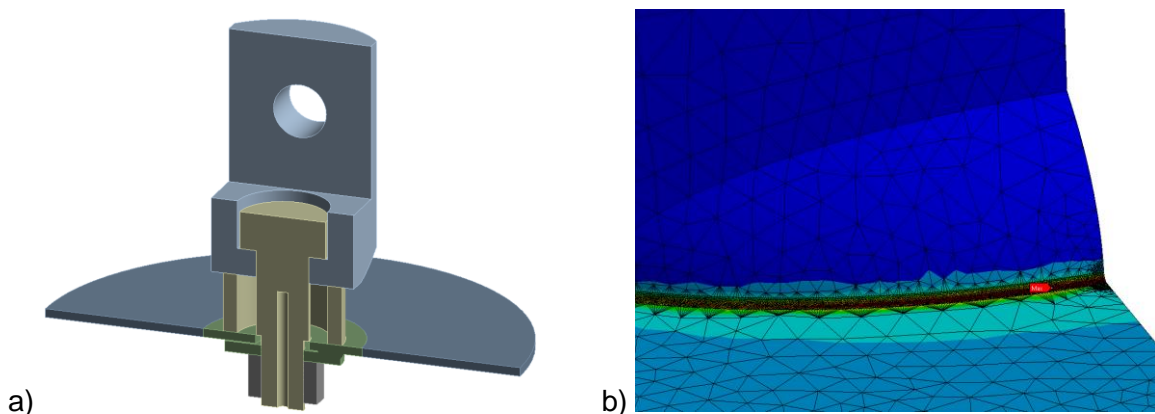


Abbildung 58: Beispiel eines FEM-Modells des schrägzugbelasteten Mutterverbunds: a) Gesamtansicht des Halb-modells, b) Detailansicht der Nahtübergangskerbe mit Stelle der höchsten Kerbspannung

6.2 Schwingfestigkeitsbewertung

Die Versuchsergebnisse der untersuchten Bolzen- und Mutterschweißverbindungen werden folgend auf Basis der FEA-Ergebnisse aus Kapitel 6.1 in Kerbspannungswöhlerlinien umgewandelt. Nach [35] wird außerdem die hochbeanspruchte Schweißnahtlänge $L_{\sigma, st}$ gemäß des 90%-Verfahrens über den statistischen Größeneinfluss n_{st} berücksichtigt, siehe Gleichung 9.

$$n_{st} = \left(\frac{L_{ref, st}}{L_{\sigma, st}} \right)^{\frac{1}{k_{st}}} = \left(\frac{100 \text{ mm}}{L_{\sigma, st}} \right)^{\frac{1}{10}} \quad (12)$$

In Abbildung 59 sind die mit Hilfe der FEA ermittelten Kerbspannungsamplituden $\sigma_{a, V}$ über die Versagensschwingspielzahlen N_f aufgetragen, wobei alle Simulationen mit Berücksichtigung der jeweiligen Vorspannkraft F_p durchgeführt wurden. Dargestellt sind ebenfalls die Wöhlerlinien für verschiedene Überlebenswahrscheinlichkeiten P_S , die mittels linearer Regression bestimmt wurden, sowie die zugehörigen Neigungen, wobei $k^* = 22$ für den Dauerfestigkeitsbereich nach [34] vorgegeben wird. Der Abknickpunkt der Wöhlerlinien wurde nach [5] und [33], bei $N = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen festgelegt. Berücksichtigt werden alle Variationen der Versuche mit Bolzen- und Mutterschweißverbindungen.

Zur praktischen Anwendung wird wie bei der Schwingfestigkeitsbewertung mittels Strukturspannungskonzept die Referenz-Wöhlerlinie bei der Überlebenswahrscheinlichkeit $P_S = 97,7 \%$ mit der Neigung $k = 4,9$ empfohlen, deren Abknickpunkt bei $\sigma_{a, V, k^*} = 217 \text{ MPa}$ und $N = 10^7$ liegt. Die Streuung von $T_S = 1:2,32$ übertrifft den für Referenz-Wöhlerlinien von Schweißverbindungen üblichen Werteberich $T_S = 1:1,7 - 1:2,03$ [18] nur geringfügig.

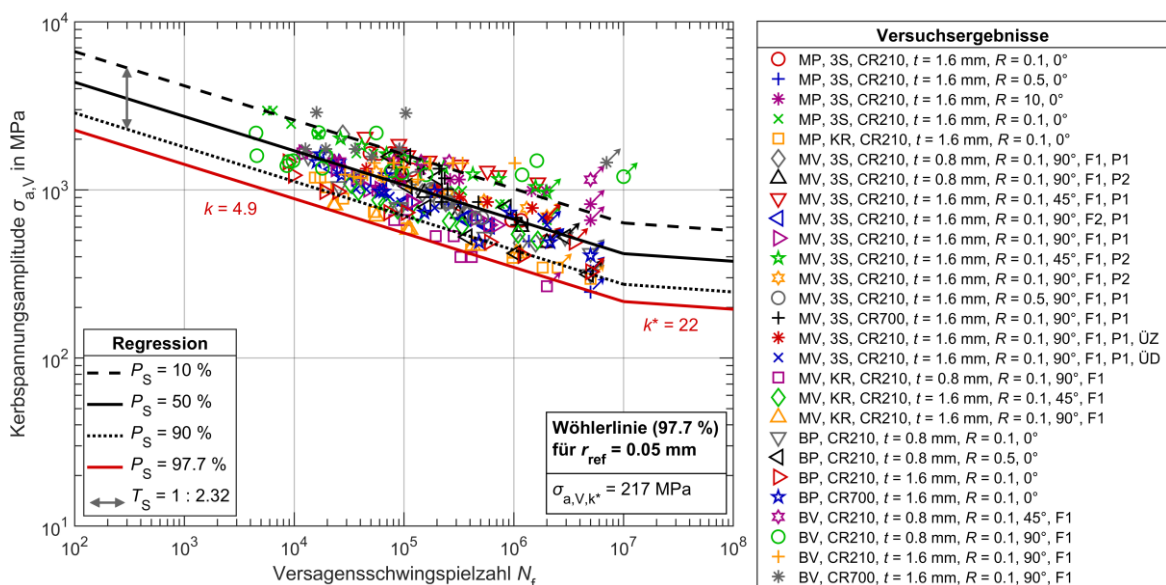


Abbildung 59: Referenz-Wöhlerlinie zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Verbindungselementen unter Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Kerbspannungskonzept für Versagensschwingspielzahlen

Allgemein ist auffällig, dass Mutterverbindungen mit kreisrunder Schweißnaht im Vergleich eine geringere Schwingfestigkeit vorweisen und im Bereich der Wöhlerlinien mit $P_S = 90\%$ und $P_S = 97,7\%$ vorzufinden sind. Mutter- sowie Bolzenverbunde, die unter 45° -Schrägzugbelastung geprüft wurden, weisen im Vergleich zur 90° -Lastrichtung generell eine höhere Schwingfestigkeit vor. Die Gesamtheit der untersuchten Verbindungselemente lässt sich dennoch durch eine einzelne gering streuende Referenz-Wöhlerlinie abbilden, da der Einfluss der unterschiedlichen Versuchskonfigurationen – hinsichtlich Lastverhältnis, Blechdicke oder Vorspannkraft – nur sehr gering ausfällt.

Abbildung 60 zeigt erneut die mittels linearer Regression ermittelten Kerbspannungswöhlerlinien unterschiedlicher Überlebenswahrscheinlichkeiten nun für die Anrisslebensdauern N_A . Die Streuung beträgt hierbei $T_S = 1:2,27$. Die Referenz-Wöhlerlinie bei der Überlebenswahrscheinlichkeit $P_S = 97,7\%$ ist durch den Abknickpunkt bei $\sigma_{a,V,k^*} = 161\text{ MPa}$ und $N = 10^7$ bestimmt und weist im Zeitfestigkeitsbereich eine Neigung von $k = 4,6$ vor. Auch hier kann die Gesamtheit der untersuchten Verbindungselemente somit durch eine einzelne gering streuende Referenz-Wöhlerlinie abgebildet werden.

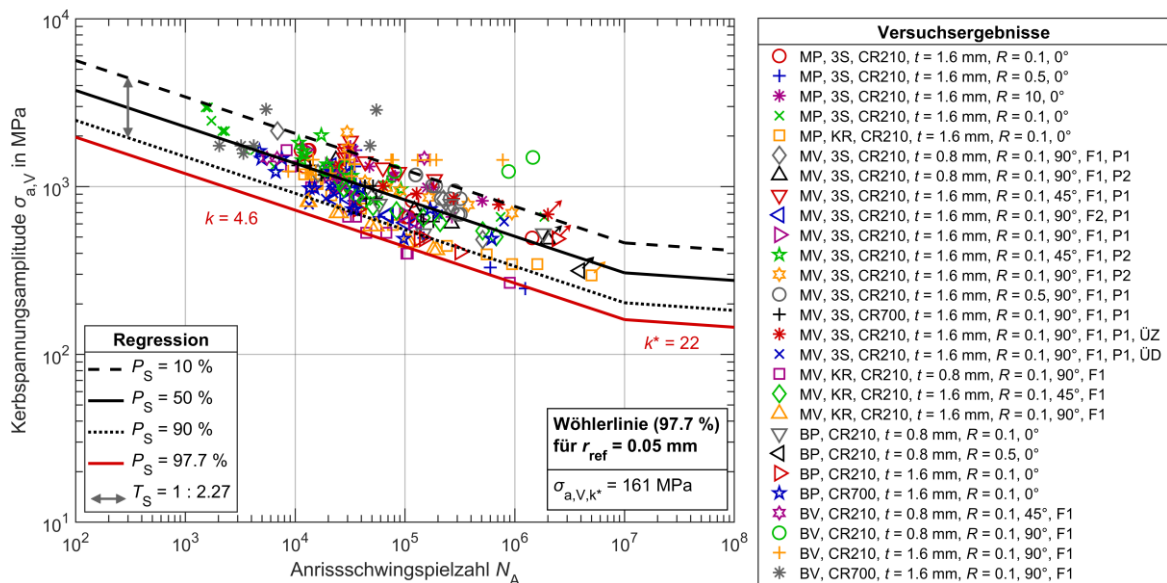


Abbildung 60: Referenz-Wöhlerlinie zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Verbindungselementen unter Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Kerbspannungskonzepts für Anrisschwingspielzahlen

Im Folgenden wird außerdem geprüft, inwiefern die Schwingfestigkeit der geschweißten Verbindungselemente durch eine gängige FAT-Klasse beschrieben werden kann, die bisher nicht für derartige Strukturen ausgelegt ist. Hierdurch soll eine allgemein gültige Formulierung der Lebensdauerabschätzung ermöglicht werden, die nicht nur auf die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Werkstoffe, genutzten Verbindungselemente und Prüfbedingungen beschränkt ist. Für die hier vorliegenden Versuchsdaten werden diese über die Kerbspannungswöhlerlinien nach [33] mit der FAT-Klasse 560

verglichen, die zusätzlich nach [15] auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_S = 50\%$ umgerechnet wird. Diese FAT-Klasse findet Verwendung bei geschweißten Blechen verschiedener Dicken sowie Punkt- und Linienschweißungen und gilt für den Werkstoff Stahl sowie einen Ersatzradius von $r_{ref} = 0,05\text{ mm}$ und Vergleichsspannungen nach von Mises als Beanspruchungskennwert bei der FE-Analyse.

In Abbildung 61 ist dargestellt, inwiefern eine zutreffende Beschreibung und sichere Auslegung der geschweißten Mutterproben durch die FAT-Klasse 560 möglich ist. Wie zu erkennen ist, liegt für die Gesamtheit aller Versuchsreihen vorwiegend eine konservative Abschätzung vor. Insbesondere für den realen Anwendungsfall eines geschweißten Verbindungselements mit Montagevorspannung unter Schrägzugbelastung lässt sich die Schwingfestigkeit sehr gut durch die Wöhlerlinie (FAT560, Neigung $k = 5$, $k^* = 22$, Überlebenswahrscheinlichkeit $P_S = 97,7\%$) abschätzen.

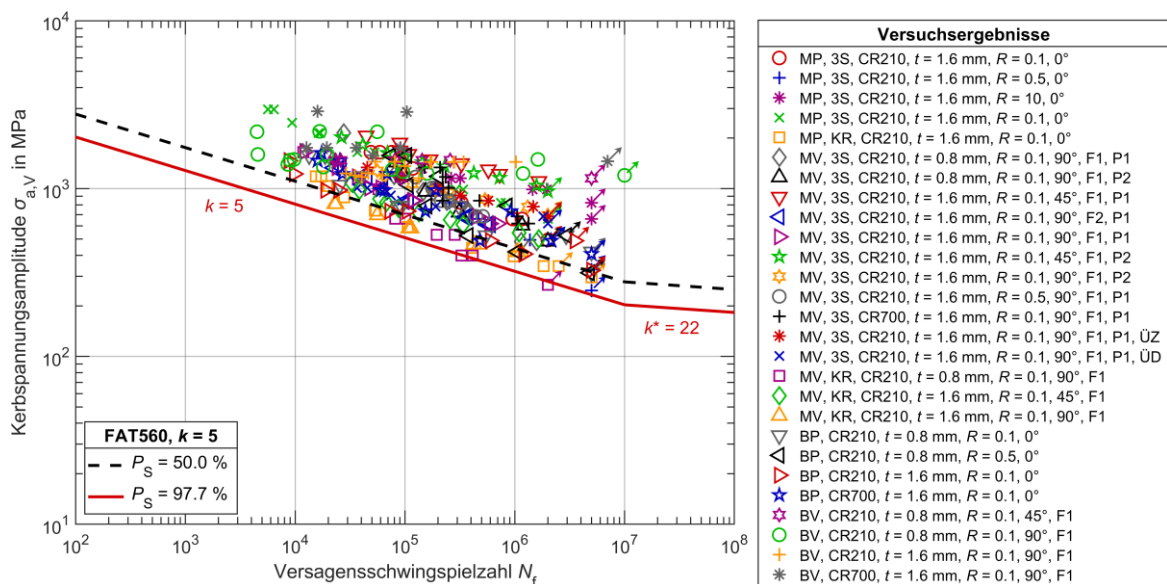


Abbildung 61: Vergleich der Versuchsergebnisse über Kerbspannungswöhlerlinien mit der FAT-Klasse 560

7 Diskussion

Anhand der hier untersuchten Bolzen und Mutterproben unter reiner Axialzugbelastung ohne Vorspannung und unter Schrägzugbelastung (mit 45° und 90° zur Mittelachse des Verbindungselements) mit Montagevorspannung konnte kein nennenswerter Einfluss durch die hier untersuchten Lastverhältnisse R_F auf die Schwingfestigkeit festgestellt werden. Ein ähnliches Verhalten konnte auch in [23] beobachtet werden und wurde auf Schweißeigenstressungen, welche auch in [24] an geschweißten Bolzenproben identifiziert wurden, zurückgeführt. Aus diesem Grund liegt die Vermutung nahe, dass auch bei den hier untersuchten Bolzen- und Mutterproben Schweißeigenstressungen vorliegen.

Bei der Analyse der Schwingfestigkeitsversuche der Bolzenproben unter Schrägzugbelastung mit Montagevorspannung, konnten frühzeitige und signifikante Vorspannkraftverluste festgestellt werden. Diese führten bei den hier untersuchten Proben zu deutlich niedrigeren Schwingfestigkeiten. Der genaue Grund für frühzeitige Vorspannkraftverluste konnte in Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden. Jedoch wird vermutet, dass diese durch Plastifizierungseffekte, selbständiges Lösen der Schraubverbindung, Rissinitiierung sowie Rissfortschritt und zu gering eingebrachter Vorspannkraft F_a erklärt werden können. Der Vorspannkraftverlust führt im Extremfall zu einem einseitigen Abheben des Adapters, was wiederum zur Erhöhung lokaler Biegebeanspruchungen an der Schweißnaht der Bolzenproben führt und demnach die Schwingfestigkeit negativ beeinflusst. Zudem konnte grundsätzlich kein negativer Einfluss der Montagevorspannung auf die Schwingfestigkeit festgestellt werden. Vielmehr wurde beobachtet, dass mit zunehmender Vorspannkraft F_p die ertragbare Kraftamplitude F_a bzw. bei gleicher Kraftamplitude F_a die Lebensdauer stieg. Dies lässt sich auf den verwendeten Adapter zurückzuführen, da das einseitige Abheben des Adapters und somit lokale Biegebeanspruchungen an der Schweißnaht der Bolzenproben mit zunehmender Vorspannkraft F_p reduziert werden.

Der signifikante Einfluss des frühzeitigen Vorspannkraftverlustes auf die Schwingfestigkeit wird verdeutlicht, bei der Betrachtung der ertragbaren Strukturspannungsamplituden $\sigma_{S,a}$ aufgetragen über den Versagensschwingspielzahlen N_f . Die geschweißten Bolzenproben B-A_210-16_90 und B-A_210-08_90 weisen im direkten Vergleich mit den restlichen Proben ca. um den Faktor 2 niedrigere ertragbare Strukturspannungsamplituden $\sigma_{S,a}$ auf, was auf den erwähnten frühzeitigen Vorspannkraftverlust dieser Proben zurückzuführen ist. Daher wurden für die Erstellung der Referenz-Wöhlerlinien die Proben B-A_210-16_90 und B-A_210-08_90 ohne bzw. nur mit einer sehr geringen Vorspannkraft von $F_p \leq 10$ N simuliert und ausgewertet. Diese Vorgehensweise führt zu einer konservativeren Bewertung, welche insbesondere für eine industrielle Anwendung empfohlen wird. Dies gilt

für den Fall, wenn Plastifizierungen oder Vorspannkraftverluste für die geplante Lebensdauer nicht ausgeschlossen werden können.

Vor der Entwicklung der Referenz-Wöhlerlinien mittels Strukturspannungskonzept mit Bezug auf die Versagenschwingspielzahlen N_f und die Anrisschwingspielzahlen $N_{A(k_{CYC}=\Delta 8\%)}$ wurde bewusst keine Mittelspannungstransformation durchgeführt, da bei der Analyse der Schwingfestigkeitsergebnisse kein nennenswerter Einfluss durch die untersuchten Lastverhältnisse R_F auf die Schwingfestigkeit festgestellt werden konnte.

Die Schwingfestigkeitsbewertung wird als gut und zielführend bewertet. Zur praktischen Anwendung wird die Referenz-Wöhlerlinie bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit $P_S = 97,7\%$ empfohlen. Sollten nachweislich keine oder nur geringe Schweißeigenstressungen in den zu bewertenden Verbindungselementen oder deutlich abweichende Lastverhältnisse R_F vorliegen, sollte zusätzlich eine Mittelspannungstransformation durchgeführt werden.

Bei der Bewertung mittels Kerbspannungskonzept konnte für alle Variationen der untersuchten Bolzen- und Mutterproben unter Axial- sowie Schrägzugbelastung eine Referenz-Wöhlerlinie abgeleitet werden, die eine treffsichere Schwingfestigkeitsbewertung der geschweißten Verbindungselemente ermöglicht. Auch hier konnte kein nennenswerter Einfluss durch die verschiedenen untersuchten Lastverhältnisse oder Mittelspannungen festgestellt werden können. Die Blechfestigkeit, Schweißnahtart bei den Mutterproben und der Winkel der Schrägzugbelastung weisen einen geringen Einfluss auf die Schwingfestigkeit vor, aber auch dieser geht in der für Schweißverbindungen typischen Streuung der Referenz-Wöhlerlinie unter. Das Phänomen des Vorspannverlusts kann bei der Bewertung mit dem Kerbspannungskonzept vernachlässigt werden. Darüber hinaus kann die Schwingfestigkeit der hier untersuchten Verbindungselemente auch allgemeingültiger durch die Wöhlerlinie der FAT560 mit einer Neigung $k = 5$ sehr zutreffend beschrieben werden.

8 Schlussfolgerung und Ausblick

Es lassen sich die folgenden wichtigsten Schlussfolgerungen ziehen:

- Anhand der hier untersuchten geschweißten Bolzen und Mutterproben konnte kein nennenswerter Einfluss durch die hier untersuchten Lastverhältnisse R_F auf die Schwingfestigkeit festgestellt werden.
- Bei der Analyse der Schwingfestigkeitsversuche der Bolzenproben unter Schrägzugbelastung mit Montagevorspannung, konnten frühzeitige und signifikante

Vorspannkraftverluste festgestellt werden, welche negative Einflüsse auf die Schwingfestigkeiten zeigten.

- Es konnte grundsätzlich kein negativer Einfluss der Montagevorspannung auf die Schwingfestigkeit festgestellt werden. Vielmehr wurde beobachtet, dass mit zunehmender Vorspannkraft F_p die ertragbare Kraftamplitude F_a bzw. bei gleicher Kraftamplitude F_a die Lebensdauer stieg.
- Es konnte gezeigt werden, dass Proben mit nachweislich frühzeitigem Vorspannkraftverlust um den Faktor 2 niedrigere ertragbare Strukturspannungsamplituden $\sigma_{S,a}$ aufweisen. Werden diese Proben jedoch ohne bzw. nur mit einer sehr geringen Vorspannkraft von $F_p \leq 10$ N simuliert und ausgewertet, zeigen diese ähnliche ertragbare Strukturspannungsamplituden $\sigma_{S,a}$ im Vergleich mit den restlichen Proben. Diese Vorgehensweise wird für eine industrielle Anwendung empfohlen. Dies gilt für den Fall, wenn Plastifizierungen oder Vorspannkraftverluste für die geplante Lebensdauer nicht ausgeschlossen werden können.
- Für eine Schwingfestigkeitsbewertung, mit Bezug auf die Anrisschwingenspielzahlen $N_{A(kcyc=\Delta 8\%)}$, sollte eine tolerierbare Spannungsamplitude $\sigma_{S,a} = 26$ MPa bei $N = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen und einer Steigung von $k = 4,5$ angenommen werden. Diese Werte stützen sich auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_S = 97,7$ %. Sollten nachweislich keine oder nur geringe Schweißeigenspannungen in den zu bewertenden Verbindungselementen oder deutlich abweichende Lastverhältnisse R_F vorliegen, sollte zusätzlich eine Mittelspannungstransformation durchgeführt werden.
- Die Schwingfestigkeitsbewertung mittels Kerbspannungskonzept ist mit Bezug auf Anrisschwingenspielzahlen N_A durch eine Referenz-Wöhlerlinie mit der Spannungsamplitude $\sigma_{S,a} = 161$ MPa bei $N = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen und einer Steigung von $k = 4,6$ möglich. Kerbspannungswöhlerlinien basieren üblicherweise auf Versagenschwingenspielzahlen N_f . Hierfür wurde eine Spannungsamplitude $\sigma_{S,a} = 217$ MPa bei $N = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen und einer Steigung von $k = 4,9$ abgeleitet. Diese Werte gelten für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_S = 97,7$ %. Eine Bewertung mittels FAT560 mit einer Neigung $k = 5$ (entsprechend $\sigma_{S,a} = 203$ MPa bei $N = 1 \cdot 10^7$) ist darüber hinaus treffsicher und abgesichert möglich und wird daher empfohlen.
- Der Abknickpunkt der Wöhlerlinien wurde im Vergleich mit der Literatur, z.B. [5], [33], bei $N = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen festgelegt. Der Wöhlerlinienast im Bereich der Langzeitfestigkeit wird nach [34] mit einer Neigung $k^* = 22$ weitergeführt.

- Für den Betriebsfestigkeitsnachweis bei variablen Amplituden wird hinsichtlich der begrenzten Datenlage eine Schadenssumme von $D = 0.5$ ohne Ansatz des Abknickpunktes, also nach Miner-elementar, empfohlen.

Für eine Anwendung in der Industrie sollten bei deutlich abweichenden Strukturen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um Einflüsse wie variierende Blechstärken, Werkstoffe, Schweißparameter, variable Amplituden und verschiedene Größen der Verbindungselemente auf die Schwingfestigkeit zu identifizieren. Dadurch können die entwickelten Referenz-Wöhlerlinien validiert und die Methode falls notwendig weiterentwickelt bzw. modifiziert werden. Das gilt insbesondere auch für den Fall der Langzeitfestigkeit jenseits von 10^7 Schwingspielen. Zudem sollte eine Validierung des Strukturspannungskonzepts mit weiteren Probentypen und kompletten Baugruppen bzw. Strukturbauteilen erfolgen, um die reale Anwendbarkeit zu überprüfen.

8.1 Vorbereitung für Validierung mittels Bauteilähnlicher Napfprobe (Strukturspannungskonzept)

Im Zuge des Forschungsvorhaben wurde von der Firma IAMT Engineering GmbH & Co. KG eine Vergleichsberechnungen zur Schwingfestigkeit von geschweißten Verbindungselementen an einer Bauteilähnlichen Napfprobe durchgeführt, Abbildung 62. Dabei wurden die Modellierungsvorschrift und Spannungsauswertung nach Kapitel 4 verwendet. Der Napf mit $t = 1,6$ mm (umgeformtes Blech) wird über 12 M6 Bolzen, welche auf das Bodenblech geschweißt sein sollen, mit dem Bodenblech mit $t = 1,6$ mm verschraubt. Dabei wurde jeweils eine Vorspannkraft von $F_p = 4$ kN aufgebracht.

Für die Durchführung der Simulation, wurden Randbedingungen und eine Lasteinleitung definiert, Abbildung 63. Die Modellierung des Kontaktbereichs zwischen Napf und Bodenblech (Flanschbereich) erfolgte nach der Kontaktdefinition aus Kapitel 4. Zudem wurden für den Napf, das Bodenblech und die Bolzen ebenfalls ein E-Modul von $E = 210$ GPa und eine Poissonzahl von $\nu = 0.3$ verwendet.

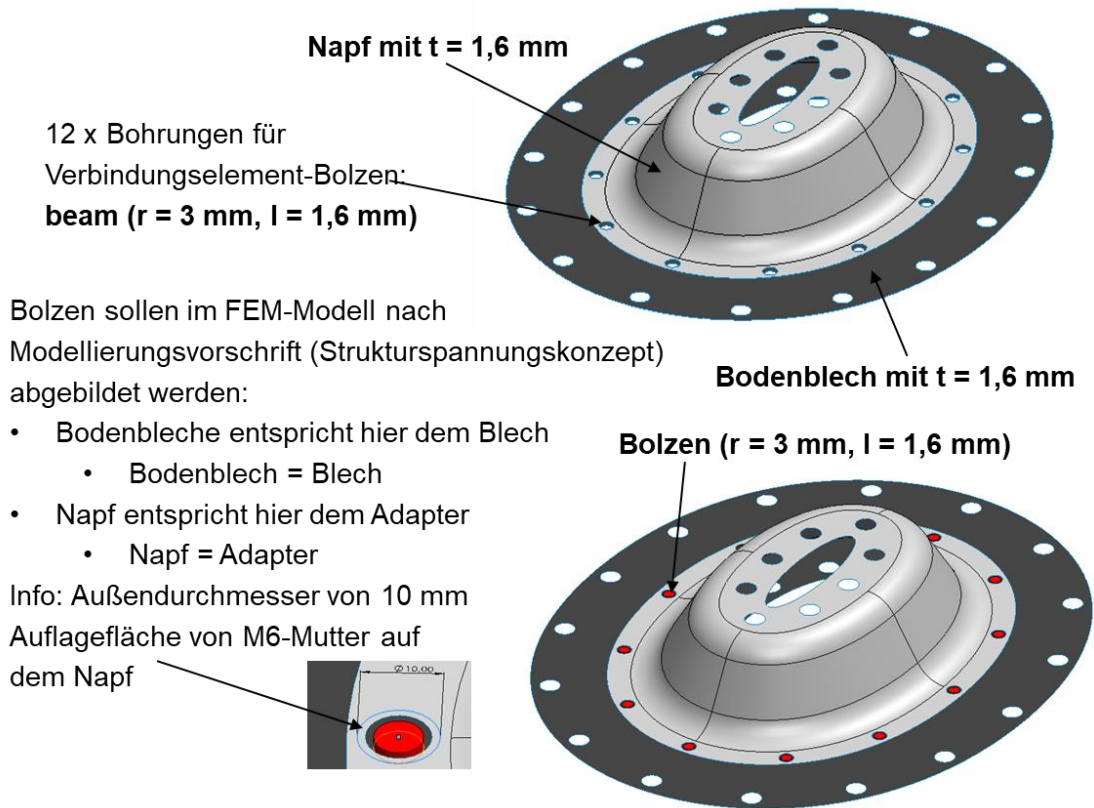


Abbildung 62: Bauteilähnliche Napfprobe zur Vergleichsberechnungen zur Schwingfestigkeit von geschweißten Verbindungselementen

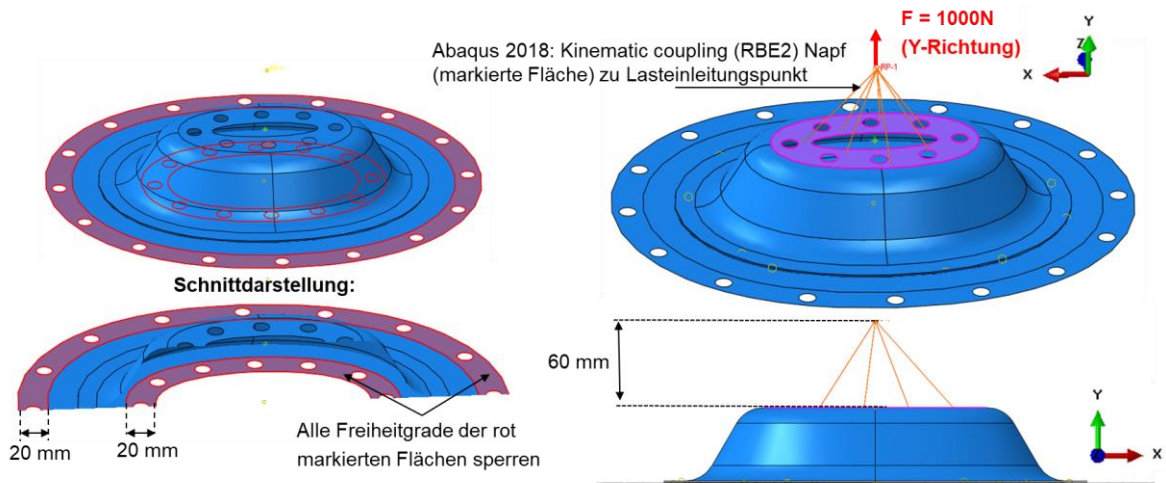


Abbildung 63: Bauteilähnliche Napfprobe: Randbedingungen und Lasteinleitung im FE-Modell

Bei der Auswertung der Strukturspannungsamplituden $\sigma_{S,a}$ der Bolzen, resultierten jeweils bei den Bolzen 2, 6, 8 und 12 die höchste Strukturspannungsamplitude von $\sigma_{S,a} = 23,4$ MPa, Abbildung 64.

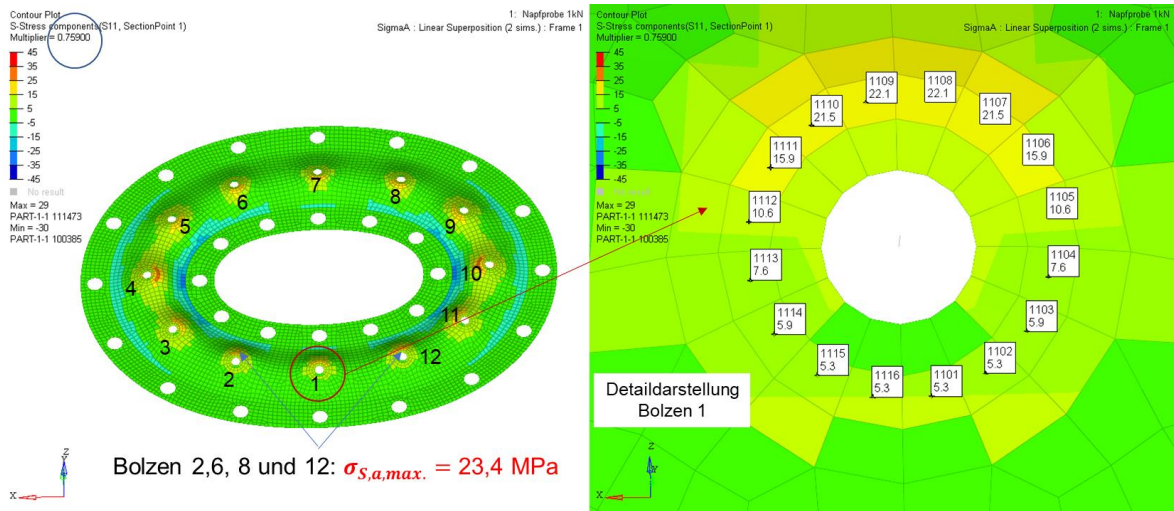


Abbildung 64: Ermittlung der max. Strukturspannungsamplitude der Bauteilähnlichen Probe nach Kapitel 4

Mit den Ergebnissen der Simulation kann eine Validierung des Strukturspannungskonzepts erfolgen, sofern zukünftig experimentelle Schwingfestigkeitsuntersuchungen mit dieser Bauteilähnlichen Napfprobe durchgeführt werden.

9 Ergänzungen zum Abschlussbericht

Angaben zur Ergänzung des Schlussberichtes gem. IGF-Leitfaden IGF-Nr.: IGF-Nr. 20818 N, Kurzthema „Verbindungselemente“:

9.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle im Rahmen des Vorhabens geleisteten Arbeiten waren in vollem Umfang zur Erreichung der im Antrag aufgeführten Ziele notwendig und angemessen. Es handelt sich um umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungsmittel sowie theoretisch-numerische Arbeiten zur Ableitung von Berechnungskonzepten für den Schwingfestigkeitsnachweis dieser Verbindungsmittel auf Basis des Strukturspannungs- und des Kerbspannungskonzeptes. Es wurden keine Geräte beschafft und keine Leistungen Dritter herangezogen.

9.1.1 Verwendung der Zuwendung

Tabelle 6: Zuwendungen LBF und IFSW

Art	LBF	IFSW
Wissenschaftlich-technisches Personal (A.1)	23,08 PM	24,00 PM
Geräte (Einzelansatz B)	entfällt	entfällt
Leistungen Dritter (Einzelansatz C)	entfällt	entfällt

9.2 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die gewonnenen Erkenntnisse über die Schwingfestigkeit der hier untersuchten geschweißten Verbindungselemente können in zukünftigen Entwicklungsprozessen berücksichtigt werden und helfen somit insbesondere im Falle von sicherheitsrelevanten Bauteilen die Bauteilzuverlässigkeit im Betrieb zu erhöhen.

Durch die beiden entwickelten Bewertungsverfahren auf Basis des Struktur- und Kerbspannungskonzeptes kann die Schwingfestigkeit der hier untersuchten geschweißten Bolzen- und Mutterverbindungen ausreichend gut abgeschätzt werden. Das entwickelte Bewertungsverfahren auf Basis des Strukturspannungskonzept eignet sich aufgrund der Verwendung von Schalenelementen (Bleche), Balkenelemente (Verbindungselemente) und einer geringen benötigten Gesamtanzahl an Elementen besonders gut für eine Anwendung unter industriellen Bedingungen. Durch die Bewertung mit vereinfachter

Modellierung (Strukturspannungskonzept), lässt sich so die Schwingfestigkeitsbewertung komplexer Baugruppen, wie zum Beispiel einer PKW-Karosserie, bereits im Entwicklungsprozess integrieren. Die Anwendung des Kerbspannungskonzeptes bietet sich für die Untersuchung spezieller Probleme einzelner geschweißter Verbindungselemente oder Gruppen von Verbindungsmitteln an.

Bei der Berücksichtigung der Montagevorspannung stellt die Korrelation mit dem sich lokal einstellenden, versagensrelevanten Beanspruchungszustand weiterhin eine Herausforderung für die Bewertung dar. Dennoch konnten aus den Ergebnissen Empfehlungen für eine Lebensdauerbewertung abgeleitet werden.

Die entwickelten Berechnungskonzepte zum Nachweis der Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungsmittel (Anschweißbolzen, Anschweißmutter) können direkt in den Unternehmen für die Auslegung der genannten Bauteile angewendet werden. Die Nachweise sind so aufbereitet, dass sie mit den üblichen zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln durchgeführt werden müssen. Dies ist insbesondere auch KMU möglich, da sich die vorgeschlagenen Berechnungskonzepte an allgemein bekannten Nachweiskonzepten wie z.B. der IIW-Richtlinie, dem EC3 oder der FKM-Richtlinie orientieren. Mit den entwickelten Berechnungskonzepten wird eine bislang bestehende Lücke gefüllt, da entsprechenden Nachweisverfahren für die untersuchten geschweißten Verbindungsmittel bislang nicht bekannt sind.

9.3 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen

1. Jöckel, J. Baumgartner, B. Möller, M Timmermann, H.T. Beier, P. Yadegari: „Fatigue strength assessment of welded steel fasteners using structural stress concept with consideration of the mounting preload“. THE 76th IIW ANNUAL ASSEMBLY AND INTERNATIONAL CONFERENCE ON WELDING AND JOINING, 2023. (Submission 01.11.2023)
2. P. YADEGARI, H. T. BEIER, M. VORMWALD, B. MÖLLER, A. JÖCKEL, J. BAUMGARTNER: „Untersuchung geschweißter Verbindungselemente unter Montagevorspannung“. DVM Tagung Werkstoffprüfung 2023 - Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand, 23. - 24. 11.2023 in Berlin

9.4 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Das vorgeschlagene und aktualisierte Transferkonzept während der Laufzeit konnte umgesetzt werden.

Die Umsetzung der noch nicht erfolgten Maßnahmen nach Abschluss des Vorhabens ist geplant. Die Durchführung der noch geplanten Transfermaßnahmen ist durch die Vernetzung der beiden FE mit Gremien, Unternehmen, Wissenschaft und Forschung sichergestellt.

9.5 Geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
A: Projektbegleitender Ausschuss	Diskussion der Projektergebnisse und des weiteren Vorgehens, Information der Industrievertreter über neue Erkenntnisse, Berücksichtigung der Anforderungen der industriellen Praxis	A1: Kick-Off-Meeting A2: PA-Telefonkonferenz A3: PA-Webkonferenz A4: PA-Webkonferenz A5: PA-Webkonferenz A6: PA-Webkonferenz	19.12.2019 21.01.2020 21.07.2020 16.03.2021 26.11.2021 22.08.2022
B: Berichtswesen innerhalb des FAT AK25	Institutionalisierter Transfer in die Wirtschaft und Diskussion der Projektergebnisse und des weiteren Vorgehens	B1: AK 25 „Fügetechnik“ B2: AK 25 „Fügetechnik“ B3: AK 25 „Fügetechnik“ B4: AK 25 „Fügetechnik“ B5: AK 25 „Fügetechnik“ B6: AK 25 „Fügetechnik“ B7: AK 25 „Fügetechnik“ B8: AK 25 „Fügetechnik“	05.02.2019 01.09.2020 10.02.2021 22.09.2021 09.02.2022 28.09.2022 08.02.2023 20.09.2023
C: Präsentation der Ergebnisse auf Fachkolloquien und Konferenzen	Transfer in die Wirtschaft, Präsentation der Ergebnisse für leitende Fachkräfte der Industrie (außerhalb des PA)	C1: DVM AK Betriebsfestigkeit C2: IIW Annual Assembly & International Conference C3: DVS CONGRESS	C1: - C2: 16.-21.07.2023 C3: -
D: Zwischen- und Abschlussberichte		D1: Zwischenbericht D2: Zwischenbericht D3: Abschlussbericht D4: Sachstandsber. (FAT) D5: Sachstandsber. (FAT) D6: Sachstandsber. (FAT)	2020 2021 30.09.2023 17.09.2021 04.02.2022 23.09.2022
E: Bilaterale Zusammenarbeit insb. mit KMU (sowohl Firmen innerhalb als auch außerhalb des PA)	Direkter Ergebnistransfer und Ausbildung, Qualifizierung von Personal insb. aus KMU soweit, dass eine selbstständige Nutzung der Ergebnisse im Unternehmen ermöglicht wird	E1: Nutzung der erarbeiteten Erkenntnisse zu den Fügeprozessen und Bewertungsmethoden bei konkreten Fragestellungen in bilateraler Zusammenarbeit mit der Industrie	Ab 2019, laufend
F: Information im Rahmen der Außendarstellung der Forschungseinrichtungen	Informieren weiterer Industrievertreter außerhalb der PA-Mitglieder über das Projekt	F1: Information auf Homepage F2: Pressemeldung F3: Integration in Instituts-Präsentation, Vorstellung bei Firmenbesuchen etc.	Ab 2019, laufend

9.6 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
A: Veröffentlichung in Fachzeitschriften, Gremien und Konferenzen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft (außerhalb des PA)	A1: Beitrag in der Zeitschrift „Schweißen und Schneiden“ A2: Beitrag im „International Journal of Fatigue“ „Welding in the World“ A3: Vorstellung der Ergebnisse in der WG3 (Stress Analysis) der Kom. XIII des IIW A4: DVM Tagung Werkstoffprüfung 2023	A1: ausstehend A2: Submission 01.11.2023 A3: 16.-21.07.2023 (siehe C2, Kapitel 9.5) A4: 23.-24.11.2023
B: Lehre an der TU Darmstadt	Langfristige Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses und somit der zukünftigen Angestellten der relevanten Industriebereiche	B1: Vorlesungen an der TU Darmstadt B2: Einbeziehung von Studierenden in die Projektbearbeitung, als Hilfskraft oder z.B. Masterarbeiter	B1: Betriebsfestigkeitsvorlesung geplant B2: HiWi fortlaufend; abgeschlossene Bachelorarbeit: 02.02.2023 am LBF, laufende Bachelorarbeit IFSW
C: Richtlinien und Merkblätter	Verbreitung der Ergebnisse über Einbezug in Merkblätter oder Richtlinien	C1: AG Q1 "Konstruktion und Berechnung" C2: AG Q1.1 "Berechnen und Gestalten"	Ab Projektende
D: Bilaterale Zusammenarbeit insb. mit KMU (sowohl Firmen innerhalb als auch außerhalb des PA)	Direkter Ergebnistransfer und Ausbildung, Qualifizierung von Personal insb. aus KMU soweit, dass eine selbstständige Nutzung der Ergebnisse im Unternehmen ermöglicht wird	D1: Nutzung der erarbeiteten Erkenntnisse zu den Fügeprozessen und Bewertungsmethoden bei konkreten Fragestellungen in bilateraler Zusammenarbeit mit der Industrie	Fortlaufend nach Projektende
E: Ergebnistransfer in Forschung, Wissenschaft, Unternehmen	Wissenschaftliche Qualifikation Projektbearbeiter/innen	E1: Dissertation	Zwei Jahre nach Projektende
F: Beratung von Unternehmen	Verbreitung der Erkenntnisse und Ergebnistransfer in die Industrie	F1: Auftragsforschung insbesondere für KMU	Fortlaufend, nach Projektende

Literaturverzeichnis

- [1] *Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung*, 2010.
- [2] J. Ringsberg, P. Orvegren, H. Henrysson und G. Akerstrom, „Sheet metal fatigue near nuts welded to thin sheet structures,“ *International Journal of Fatigue*, Bd. 30, pp. 877-887, 5 2008.
- [3] J. Hildebrand und H. Soltanzadeh, „A review on assessment of fatigue strength in welded studs,“ *International Journal of Steel Structures*, Bd. 14, pp. 421-438, 6 2014.
- [4] D. Radaj, C. M. Sonsino und W. Fricke, *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*, Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [5] A. F. Hobbacher, *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*, Springer International Publishing, 2016.
- [6] E. Haibach, *Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*, 3. Auflage Hrsg., Springer VDI, 2006.
- [7] D. Radaj, C. M. Sonsino und W. Fricke, „Recent developments in local concepts of fatigue assessment of welded joints,“ *Int. J. Fatigue*, Bd. 31, p. 2–11, 2009.
- [8] A. Rupp, K. Störzel und V. Grubisic, „Computer aided dimensioning of spot-welded automotive structures,“ in *SAE 1995 World Congress*, 1995.
- [9] R. Olivier und V. B. Koettgen, *Schweißverbindungen I - Schwingfestigkeitsnachweis für Schweissverbindungen auf der Grundlage örtlicher Beanspruchungen*, Abschlussbericht, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), 1989.
- [10] D. Radaj, Hrsg., *Design and analysis of fatigue resistant welded structures*, Woodhead Publishing; Cambridge, 1990.
- [11] H. Neuber, „Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen,“ *Konstruktion*, Bd. 20, pp. 245-251, 1968.
- [12] G. Zhang und B. Richter, „A new approach to the numerical fatigue-life prediction of spot-welded structures,“ *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, Bd. 23, pp. 499-508, 2000.
- [13] G. Zhang und C. M. Sonsino, „Ein Kerbspannungskonzept für die Schwingfeste Bemessung von Rissähnlichen Schweißnähten aus Aluminiumlegierungen,“ in *DVM-Bericht 132 - Fügen und Betriebsfestigkeit*, 2005.

- [14] M. Eibl, „Berechnung der Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Feibleche mit lokalen Konzepten,“ 2003.
- [15] C. M. Sonsino, „A consideration of allowable equivalent stresses for fatigue design of welded joints according to the notch stress concept with reference radii $r_{ref} = 1.00$ and 0.05 mm,“ *Weld. World*, Bd. 53, pp. 64-75, 2009.
- [16] T. Bruder, K. Störzel, J. Baumgartner und H. Hanselka, „Evaluation of nominal and local stress based approaches for the fatigue assessment of seam welds,“ *Int. J. Fatigue*, Bd. 34, pp. 86-102, 2012.
- [17] B. Kranz und C. M. Sonsino, „Verification of FAT values for the application of the notch stress concept with the reference radii $r_{(ref)}=1.00$ and 0.05 mm,“ *Weld. World*, Bd. 54, pp. R218-R224, 2010.
- [18] J. Baumgartner, H. Schmidt, E. Ince, T. Melz und K. Dilger, „Fatigue assessment of welded joints using stress averaging and critical distance approaches,“ *Welding in the World*, Bd. 59, pp. 731-742, 2015.
- [19] J. Baumgartner, E. Ince und H. Schmidt, „FAT-Schriftenreihe 259: Erweiterung des Kerbspannungskonzepts auf Nahtübergänge von Linienschweißnähten an dünnen Blechen,“ 2013.
- [20] H. F. Moore, „A study of size effect and notch sensitivity in fatigue tests of steel,“ in *Proc. ASTM*, 1945.
- [21] D. Taylor, „Geometrical effects in fatigue: A unifying theoretical model,“ *Int. J. Fatigue*, Bd. 21, pp. 413-420, 1999.
- [22] G. Zhang, „Method of effective stress for fatigue: Part I – A general theory,“ *Int. J. Fatigue*, Bd. 37, pp. 17-23, 2012.
- [23] W. Fricke und D. D. Tchuindjang, „Fatigue strength behaviour of stud-arc welded joints in load-carrying ship structures,“ *Welding in the World*, Bd. 57, pp. 495-506, 3 2013.
- [24] „Bericht 5159/2011: Bewertung und Optimierung der Tragfähigkeit von Gewindebolzenschweißverbindungen unter Ermüdungsbeanspruchung,“ 2011.
- [25] P. Balon und A. Świątoniowski, „Forming of Automotive Parts with Nuts Clinch Process in Comparison to Welding of Nuts,“ *Key Engineering Materials*, Bd. 611, pp. 1503-1510, 5 2014.
- [26] *AWS D1.1/D1.1M:2010 Structural welding code - steel*, 2010.

- [27] *British Standard BS 7608:2013 Guide to fatigue design and assessment of steel products*, 2013.
- [28] *DVS Merkblatt 0905 - Industrielle Anwendung des Kerbspannungskonzeptes für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen*, 2017.
- [29] A. Dürr, „Zur Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höherfesten Baustählen bei Anwendung von UIT-Nachbehandlung,“ 2007.
- [30] H. H. Minner, „Schwingfestigkeitserhöhung von Schweißverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen StE 460 und StE 690 durch Einsatz des WIG-Nachbehandlungsverfahrens,“ 1981.
- [31] U. H. Clormann und T. Seeger, „RAINFLOW-HCM. Ein Zählverfahren für Betriebsfestigkeitsnachweise auf werkstoffmechanischer Grundlage,“ *Stahlbau*, Nr. Heft 3, Jahrgang 55, pp. 56-71, 1986.
- [32] K. Störzel und J. Baumgartner, „Statistical evaluation of fatigue tests using maximum likelihood, *Materials Testing*, vol. 63, p. 714–720, 8 2021.,“ *Materials Testing*, Bd. 63(8), pp. 714-720, 2021.
- [33] C. M. Sonsino, T. Bruder und J. Baumgartner, „SN lines for welded thin joints – suggested slopes and FAT values for applying the notch stress concept with various reference radii,“ *Weld. World*, Bd. 54, Nr. 11-12, pp. 375-392, 2010.
- [34] C. M. Sonsino, „Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety,“ *International Journal of Fatigue*, Bd. 29(12), pp. 2246-2258, 2007.
- [35] A. Deinböck, A. C. Hesse, M. Wächter, A. Esderts, J. Hensel und K. Dilger, „Berücksichtigung der höchstbeanspruchten Schweißnahtlänge im Kerbspannungskonzept,“ in *DVS-Abschlussbericht*, 2020.
- [36] C. M. Sonsino, M. Kaßner und W. Fricke, „Stand von Bemessungskonzepten zur schwingfesten Auslegung von Schweißverbindungen,“ in *DVS-Berichte Band 256*, 2009, pp. 1-25.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mutterproben (links) und Bolzenproben.....	9
Abbildung 2: Typische Schweißnähte der Bolzenverbindungen	9
Abbildung 3: Local geometry of the seam weld of the bolt specimens.....	10

Abbildung 4: Mikrostruktur und lokale Geometrie der Schweißnaht der Bolzenprobe 210-08.....	11
Abbildung 5: Mikrostruktur und lokale Geometrie der Schweißnaht der Bolzenprobe 210-16.....	11
Abbildung 6: Mikrostruktur und lokale Geometrie der Schweißnaht der Bolzenprobe 700-16.....	12
Abbildung 7: Typische Schweißnähte der Mutterverbindungen, links: kreisrund, rechts: drei Segmente.	12
Abbildung 8: Lokale Geometrie der Schweißnaht der Mutterprobe, rund geschweißt 210-16 (1) und 3 Segmente geschweißt 210-08 (2).....	13
Abbildung 9: Schematischer Aufbau zur Einleitung für Axial-/Schrägzugbelastungen von Bolzen-/Mutterproben	17
Abbildung 10: Versuchsaufbau für Bolzenproben unter Axialbelastung (0°).....	18
Abbildung 11: Versuchsaufbau für Mutterproben unter Schrägzugbelastung (90°)	19
Abbildung 12: Napfbildung durch zu hohes Drehmoment bei der Montage im Falle der Bolzenproben (210-08).....	20
Abbildung 13: Verwendete Bolzen- und Mutteradapter	20
Abbildung 14: Einspannvorrichtung für Validierung des DMS-Adapters (Bolzenproben) 21	
Abbildung 15: Dehnungsabgleich zwischen experimentell gemessenen und simulierten Dehnungen (Bolzenproben)	22
Abbildung 16: Exp. gemessenen und gemittelten Dehnungen mit Anzugsversuchen (Bolzenproben).....	23
Abbildung 17: Korrelation zwischen Kraft und Drehmoment (Bolzenproben).....	23
Abbildung 18: Schraubenkraft in Abhängigkeit des Drehmoments, Mutterproben	24
Abbildung 19: Beispielhafte Versagensbilder der Rückseite von Bolzen- und Mutterproben unter Schrägzugbelastung.....	26
Abbildung 20: Beispielhafter typischer zyklischer Steifigkeitsverlauf einer Bolzenprobe unter Schrägzugbelastung.....	28
Abbildung 21: Beispielhafter ansteigender zyklischer Steifigkeitsverlauf einer Bolzenprobe unter Schrägzugbelastung.....	28
Abbildung 22: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Bolzen- und Mutterproben, Kraftamplitude aufgetragen über der Versagensschwingspielzahl N_f	30
Abbildung 23: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Bolzen- und Mutterproben, Kraftamplitude aufgetragen über der Anrisschwingspielzahl $NA(k_{cyc} = \Delta 8\%)$	30

Abbildung 24: Einfluss des Anzugsmoments auf die Schwingfestigkeit, Probe B-A_210-08_90.....	31
Abbildung 25: Dehnungsamplitudenverlauf der Probe 011, B-A_210-16_90.....	32
Abbildung 26: Dehnungsamplitudenverlauf der Probe 037, B-A_210-16_90.....	33
Abbildung 27: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben, Kraftamplitude F_a aufgetragen über der Versagensschwingspielzahl N_f	35
Abbildung 28: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben, Kraftamplitude F_a aufgetragen über der Anrisschwingspielzahl N_A	35
Abbildung 29: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Anrisschwingspielzahl. Varianten: Lastrichtung 45° mit Mutterposition P1 (1 Segment unter Biegezug) und P2 (2 Segmente unter Biegezug)	36
Abbildung 30: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: reduzierte Schraubenvorspannung $F = 10$ kN, R-Verhältnis $R = 0,5$, höhere Blechfestigkeit $R_{p0,2} = 700$ MPa	37
Abbildung 31: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: geringere Blechdicke $t = 0,8$ mm, gedrehte Mutterposition P2 mit 2 Segmenten unter Biegezug	38
Abbildung 32: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: Lastrichtung 45° mit Mutterposition P1 (1 Segment unter Biegezug) und P2 (2 Segmente unter Biegezug).....	39
Abbildung 33: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: kreisrunde Anschweißmuttern bei Blechdicken 0,8 mm / 1,6 mm und Lastrichtung 90° und 45°	40
Abbildung 34: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: Referenzproben mit Zug- bzw. Drucküberlast	41
Abbildung 35: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterproben unter Axialbeanspruchung, dazu der Referenzfall der Mutterverbundproben.....	42
Abbildung 36: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche von Mutterverbundproben. Referenzfall und Varianten: variable Amplituden, Gaußlastfolge 5E4 (48719 Schwingspiele), 2 Versionen $R = 0,1$	45
Abbildung 37: FE-Modell Bolzenproben, Axialzug.....	48
Abbildung 38: FE-Modelle der Mutterproben mit kreisrunder Schweißnaht und Punktschweißungen mit drei Segmenten, Axialzug	48
Abbildung 39: FE-Modelle Bolzen- und Mutterproben, Schrägzug	49
Abbildung 40: Ermittlung der Strukturspannung an Anlehnung an FESPOW-Konzept [8].....	50

Abbildung 41: Strukturspannungen σ_S, a aufgetragen über der Versagensschwingspielzahlen N_f	51
Abbildung 42: Referenz-Wöhlerlinie ohne Mittelung der Neigung, zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Stahl- Verbindungselemente mit Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Strukturspannungskonzepts, Versagensschwingspielzahlen N_f	52
Abbildung 43: Referenz-Wöhlerlinie ohne Mittelung der Neigung, zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Stahl- Verbindungselemente mit Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Strukturspannungskonzepts, Anrisschwingspielzahlen $NA(kcyc = \Delta 8\%)$	53
Abbildung 44: Referenz-Wöhlerlinie (Bolzenproben) ohne Mittelung der Neigung, Versagensschwingspielzahlen N_f	54
Abbildung 45: Referenz-Wöhlerlinie (Bolzenproben) ohne Mittelung der Neigung, Anrisschwingspielzahlen $NA(kcyc = \Delta 8\%)$	54
Abbildung 46: Referenz-Wöhlerlinie (Mutterproben) ohne Mittelung der Neigung, Versagensschwingspielzahlen N_f	55
Abbildung 47: Referenz-Wöhlerlinie (Mutterproben) ohne Mittelung der Neigung, Anrisschwingspielzahlen $NA(kcyc = \Delta 8\%)$	55
Abbildung 48: Referenz-Wöhlerlinie mit Mittelung der Neigung, zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Stahl- Verbindungselemente mit Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Strukturspannungskonzepts, Versagensschwingspielzahlen N_f	56
Abbildung 49: Referenz-Wöhlerlinie mit Mittelung der Neigung, zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Stahl- Verbindungselemente mit Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Strukturspannungskonzepts, Anrisschwingspielzahlen $NA(kcyc = \Delta 8\%)$	57
Abbildung 50: Referenz-Wöhlerlinie (Bolzenproben) mit Mittelung der Neigung, Versagensschwingspielzahlen N_f	58
Abbildung 51: Referenz-Wöhlerlinie (Bolzenproben) mit Mittelung der Neigung, Anrisschwingspielzahlen $NA(kcyc = \Delta 8\%)$	58
Abbildung 52: Referenz-Wöhlerlinie (Mutterproben) mit Mittelung der Neigung, Versagensschwingspielzahlen N_f	59
Abbildung 53: Referenz-Wöhlerlinie (Mutterproben) mit Mittelung der Neigung, Anrisschwingspielzahlen $NA(kcyc = \Delta 8\%)$	59
Abbildung 54: Beispiel eines FEM-Modells der axial beanspruchten Bolzenprobe: a) Gesamtansicht des 2D-Modells, b) Detailansicht der Nahtübergangskerbe mit Stelle der höchsten Kerbspannung	60

Abbildung 55: Beispiel eines FEM-Modells des schrägzugbelasteten Bolzenverbunds: a) Gesamtansicht des Halb-modells, b) Detailansicht der Nahtübergangskerbe mit Stelle der höchsten Kerbspannung	61
Abbildung 56: Modellierung der Schweißnaht auf Basis der CT-Scans, Extraktion der Schweißnaht und Approximation durch Ellipsoid für FE-Analysen.....	61
Abbildung 57: Beispiel eines FEM-Modells der axial beanspruchten Mutterprobe: a) Gesamtansicht des 2D-Modells, b) Detailansicht der Nahtübergangskerbe mit Stelle der höchsten Kerbspannung	62
Abbildung 58: Beispiel eines FEM-Modells des schrägzugbelasteten Mutterverbunds: a) Gesamtansicht des Halb-modells, b) Detailansicht der Nahtübergangskerbe mit Stelle der höchsten Kerbspannung	62
Abbildung 59: Referenz-Wöhlerlinie zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Verbindungselementen unter Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Kerbspannungskonzepts für Versagensschwingspielzahlen.....	63
Abbildung 60: Referenz-Wöhlerlinie zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Verbindungselementen unter Berücksichtigung der Montagevorspannung mittels Kerbspannungskonzepts für Anrisschwingspielzahlen.....	64
Abbildung 61: Vergleich der Versuchsergebnisse über Kerbspannungswöhlerlinien mit der FAT-Klasse 560	65
Abbildung 62: Bauteilähnliche Napfprobe zur Vergleichsberechnungen zur Schwingfestigkeit von geschweißten Verbindungselementen.....	70
Abbildung 63: Bauteilähnliche Napfprobe: Randbedingungen und Lasteinleitung im FE-Modell.....	70
Abbildung 64: Ermittlung der max. Strukturspannungsamplitude der Bauteilähnlichen Probe nach Kapitel 4	71

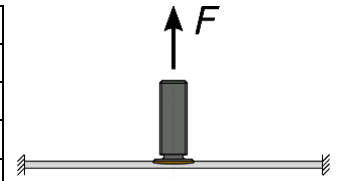
Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Blechvariationen	8
Tabelle 2: Versuchsreihenübersicht der Bolzenproben	15
Tabelle 3: Versuchsreihenübersicht der Mutterproben	16
Tabelle 4: Übersicht über die Versuche zum Mutterverbund	34
Tabelle 5: Ergebnisse der Versuche mit Mutterverbund unter variablen Amplituden, Gaußlastfolge 5E4 mit Umfang 97439 Umkehrpunkten bzw. 48719 Schwingspielen	46
Tabelle 6: Zuwendungen LBF und IFSW.....	72

A. Anhang Schwingfestigkeitsergebnisse Bolzenproben

1. Versuchsreihe BO-210-08-00-CA-01

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-08-00-CA-01
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	0
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	- (ohne Adapter)
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

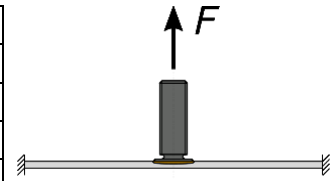
Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	CR210-08_201_B		0	10	60	5.000.000	-	Durchläufer
2	CR210-08_201_B_h		0	5	300	18.739	-	201_B hochgesetzt
3	CR210-08_210_B		0	15	150	309.791	261.028	
4	CR210-08_220_B		0	?	300	13.427	-	
5	CR210-08_200_B		0	15	100	2.935.865	1.821.380	
6	CR210-08_202_B		0	5	225	40.027	-	
7	CR210-08_193_B		0	5	200	25.522	-	
8	CR210-08_050_B		0	15	150	86.803	58.462	
9	CR210-08_079_B		0	15	100	545.168	148.084	
10	CR210-08_078_B		0	15	150	89.515	-	
11	CR210-08_077_B		0	15	150	276.144	-	
12	CR210-08_076_B		0	15	150	92.276	-	
13	CR210-08_071_B		0	15	150	1.016.949	-	
14	CR210-08_072_B		0	20	80	5.000.000	-	Durchläufer

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

--	--	--	--	--	--	--	--	--

2. Versuchsreihe BO-210-08-00-CA-05

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-08-00-CA-05
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	0
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,5
Anzugsmoment M_A [Nm]	- (ohne Adapter)
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

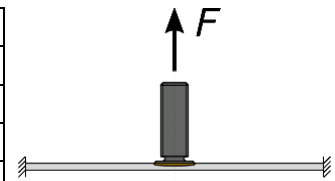
Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	CR210-08_197_B		0	5	200	107.473	-	
2	CR210-08_198_B		0	15	100	2.970.554	-	
3	CR210-08_199_B		0	5	300	104.158	-	
4	CR210-08_196_B		0	10	150	857.856	-	
5	CR210-08_195_B		0	10	225	201.338	-	
6	CR210-08_194_B		0	15	100	377.529	-	
7	CR210-08_188_B		0	5	300	74.297	-	
8	CR210-08_192_B		0	5	450	99.587	-	
9	CR210-08_073_B		0	5	450	59.154	-	
10	CR210-08_186_B		0	10	150	159.104	-	
11	CR210-08_187_B		0	20	80	1.046.361	-	
12	CR210-08_185_B		0	25	60	4.801.496	3.920.450	

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

--	--	--	--	--	--	--	--	--

3. Versuchsreihe BO-210-16-00-CA-01

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-16-00-CA-01
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	0
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	- (ohne Adapter)
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

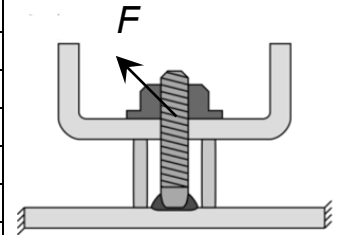
Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	CR210-16_040_B		0	15	150	920.031	-	
2	CR210-16_040_B_h		0	15	450	104.393	-	Hochgesetzt aus Nr. 1
3	CR210-16_039_B		0	15	200	5.000.000	-	
4	CR210-16_035_B		0	5	900	8.767	-	
5	CR210-16_036_B		0	15	300	3.525.511	2.417.920	
6	CR210-16_034_B		0	5	600	24.871	-	
7	CR210-16_030_B		0	5	600	23.153	-	
8	CR210-16_003_B		0	15	450	82.678	43.864	
9	CR210-16_032_B		0	5	600	18.926	-	
10	CR210-16_027_B		0	15	450	72.624	37.102	
11	CR210-16_025_B		0	15	300	598.419	133.876	
12	CR210-16_038_B		0	10	750	9.804	-	
13	CR210-16_028_B		0	20	250	1.210.778	314.926?	
14	CR210-16_026_B		0	15	300	528.009	149.428	

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

--	--	--	--	--	--	--	--	--

4. Versuchsreihe BO-210-08-45-CA-01-20

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-08-45-CA-01-20
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	45
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	2,0 (1,5)
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

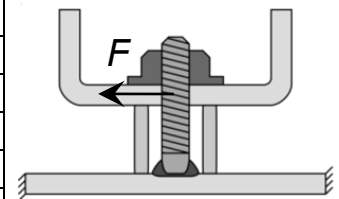
Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	CR210-08_209_B	2,0		10	75	1.781.424	-	Durchläufer
2	CR210-08_209_B_h	2,0	620	10	150	23.372	-	
3	CR210-08_207_B	2,0	620	10	125	80.639	5536	
4	CR210-08_204_B	2,0	620	10	100	258.007	150244	
5	CR210-08_205_B	1,5	481	10	100	92.230	24016	
8	CR210-08_062_B	1,5	481	10	150	22.977	6846	
11	CR210-08_067_B	2,0	620	10	100	143.203	32999	
13	CR210-08_069_B	1,5	481	10	100	5,00E+06	-	
14	CR210-08_069_B_h		481	10	150	25.984	-	
15	CR210-08_0xx_B	1,5		10	75	(20.000)		

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

6	CR210-08_074_B	2,0	620	40	100	898.766	586444	Versagen Adapterinnenkante
7	CR210-08_075_B	2,0	620	40	150	220.282	482860	Versagen Adapterinnenkante
9	CR210-08_061_B	1,5	-	40	125	-	-	Überlast - nicht weitergeprüft
10	CR210-08_070_B	1,5	-	40	400	-	-	Überlast
12	CR210-08_066_B	1,5	481	40	80	5,00E+06	-	Durchläufer mit Versagen Adapterinnenkante

5. Versuchsreihe BO-210-08-90-CA-01-20

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-08-90-CA-01-20
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	2,0
Überlast	- (nein)

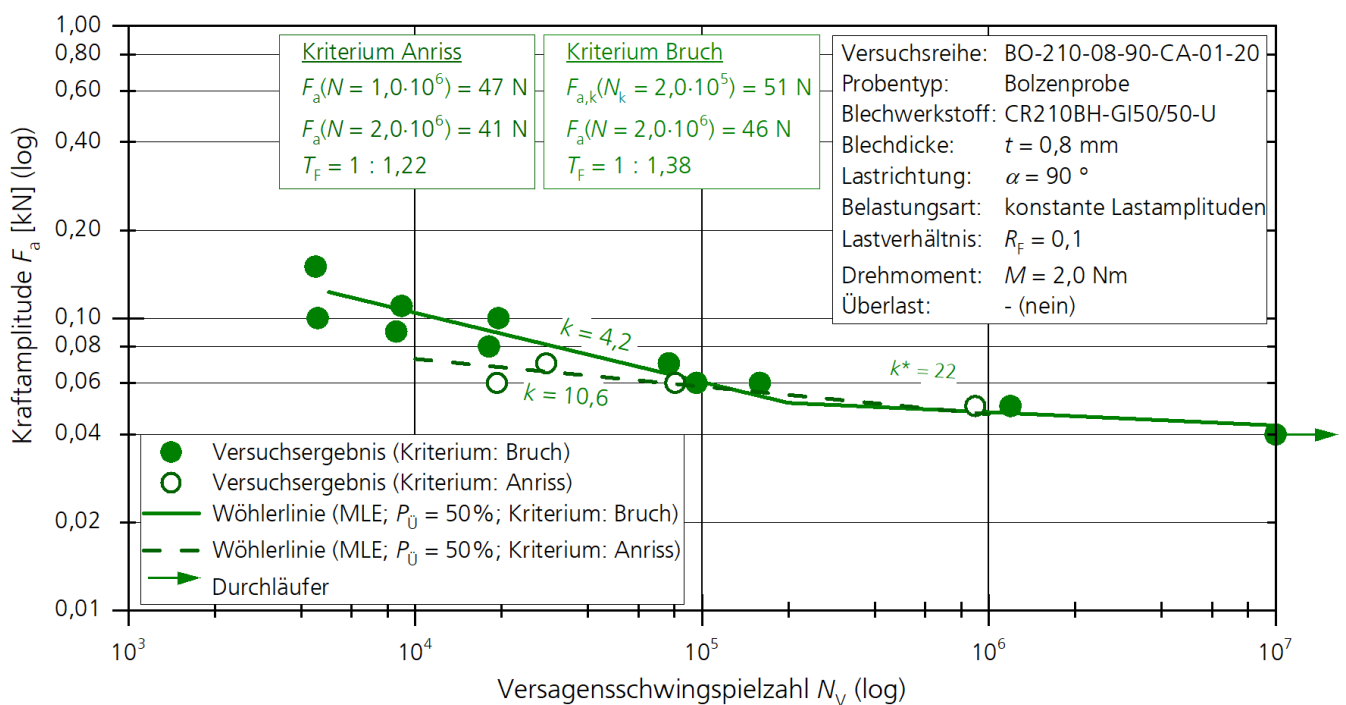


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

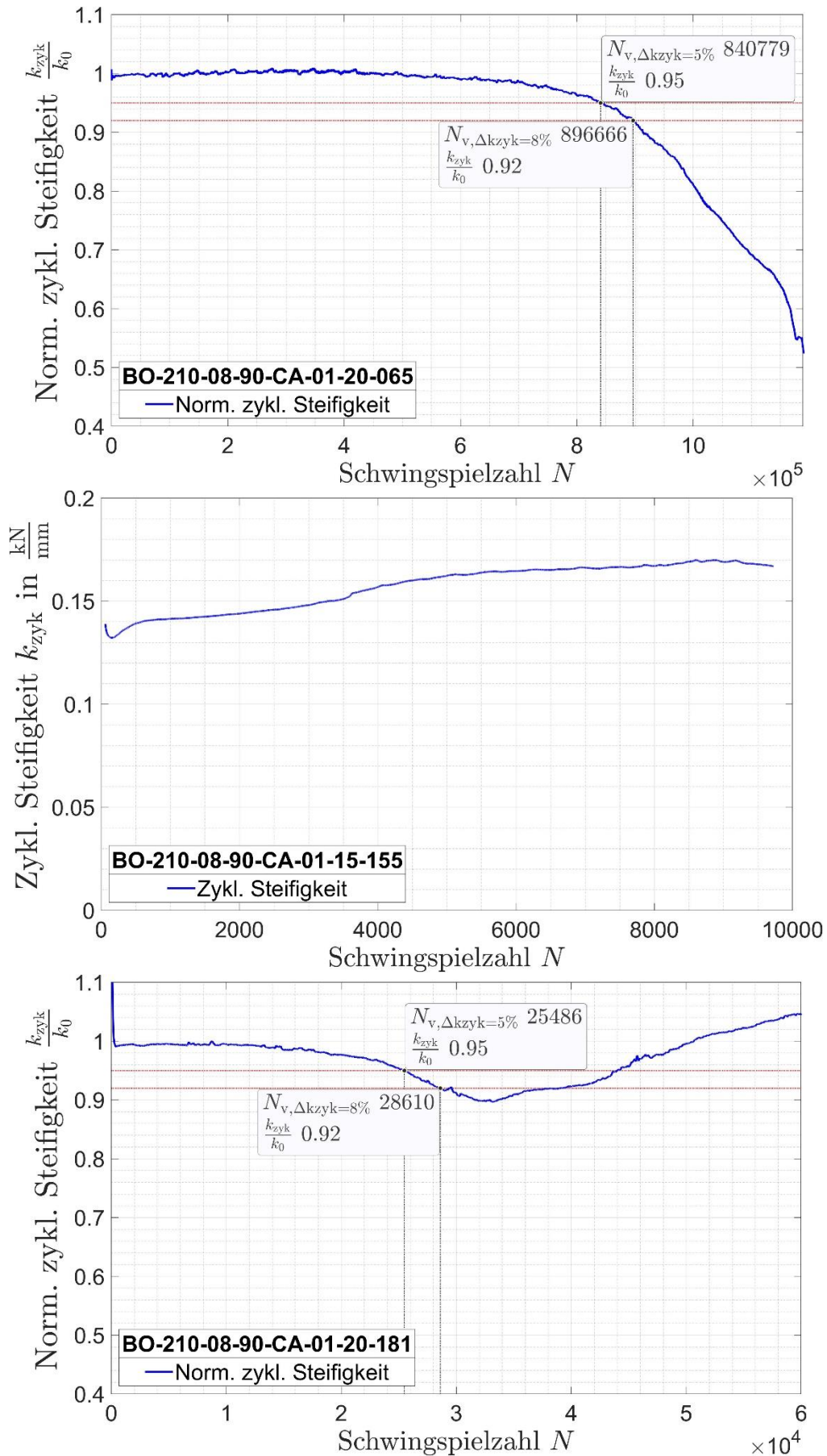
Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	CR210-08_189_B	2,0	620	5	150	4.492	-	Kurzzeitfestigkeit
2	CR210-08_130_B	2,0	620	5	100	19.502	-	
3	CR210-08_151_B	2,0	620	5	60	159.110	80.653	
4	CR210-08_157_B	2,0	620	5	80	18.068	-	
5	CR210-08_181_B	2,0	620	5	70	76.594	28.610	
6	CR210-08_191_B	2,0	620	5	110	8.957	-	
7	CR210-08_182_B	2,0	620	5	40	10.000.000	-	Durchläufer
8	CR210-08_065_B	2,0	620	5	50	1.190.039	896.666	
9	CR210-08_068_B	2,0	620	5	90	8.579	-	
10	CR210-08_042_B	2,0	620	5	100	4.569	-	Kurzzeitfestigkeit
11	CR210-08_060_B	2,0	620	5	60	95.680	19.267	

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

12	CR210-08_203_B	2,0	620	10	150	55.982	-	Anzugsmoment weicht ab, Steifigkeitsverlauf steigend
13	CR210-08_217_B	6-8	-	10	150	160.401	-	Versagen Adapterkante
14	CR210-08_213_B	3,0	854	10	150	273.319	-	Versagen Adapterkante
15	CR210-08_214_B	2,5	703	10	150	186.462	-	Versagen Adapterkante
16	CR210-08_211_B	2,5	703	10	200	127.086	-	Versagen Adapterkante
17	CR210-08_190_B	2,0	620	5	100	497	-	Überlast: nicht valide

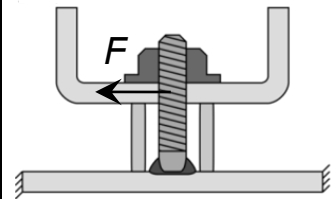


Steifigkeitsverläufe (exemplarisch)



6. Versuchsreihe BO-210-08-90-CA-01-15

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-08-90-CA-01-15
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	1,5
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

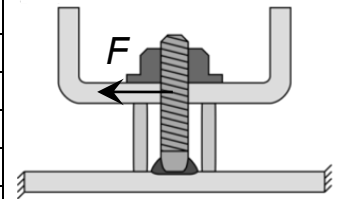
Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	CR210-08_216_B	1,5	481	10	150	16.709	-	
2	CR210-08_208_B	1,5	481	10	100	1.623.051	1.462.000	
3	CR210-08_155_B	1,5	481	5	100	9.774	-	
4	CR210-08_160_B	1,5	481	5	100	9.780	-	

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

	CR210-08_212_B??							
--	------------------	--	--	--	--	--	--	--

7. Versuchsreihe BO-210-08-90-VA-01-20

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-08-90-VA-01-20
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	variable Lastamplituden (VA)
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	2,0
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

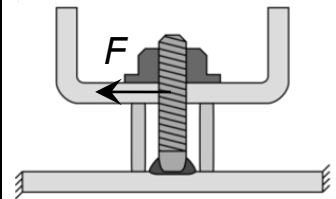
Nr.	Proben- bezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

--	--	--	--	--	--	--	--	--

8. Versuchsreihe BO-210-08-90-CA-05-20

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-08-90-CA-05-20
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,5
Anzugsmoment M_A [Nm]	2,0
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

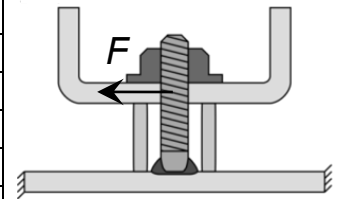
Nr.	Proben- bezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

--	--	--	--	--	--	--	--	--

9. Versuchsreihe BO-210-08-90-CA--1-20

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-08-90-CA--1-20
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	-1
Anzugsmoment M_A [Nm]	2,0 (1,5)
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

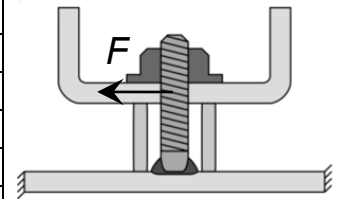
Nr.	Proben- bezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

--	--	--	--	--	--	--	--	--

10. Versuchsreihe BO-210-08-90-CA-01-20-ÜL

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-08-90-CA-01-20-ÜL
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	2,0
Überlast	ja



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

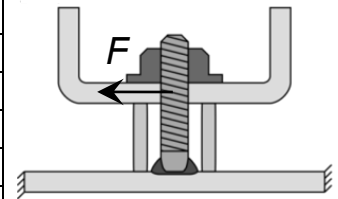
Nr.	Proben- bezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

--	--	--	--	--	--	--	--	--

11. Versuchsreihe BO-210-16-90-CA-01-35

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-16-90-CA-01-35
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	3,5
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

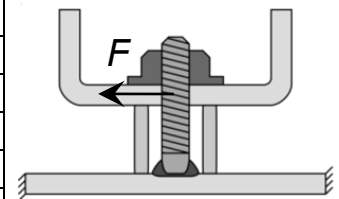
Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	CR210-16_037 B	3,5	1334			29.127	8669	
2	CR210-16_024 B	3,5	1670			277.789	130403	
3	CR210-16_023 B	3,5	1578			174.820	74900	
4	CR210-16_020 B	3,5	1737			53.786	14534	
5	CR210-16_021 B	3,5	1443			40.423	14075	
6	CR210-16_022 B	3,5	1490			34.902	12978	
7	CR210-16_033 B	3,5				5.000.000		

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

--	--	--	--	--	--	--	--	--

12. Versuchsreihe BO-210-16-90-CA-01-50

Versuchsreihenbezeichnung	BO-210-16-90-CA-01-50
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	5,0
Überlast	- (nein)

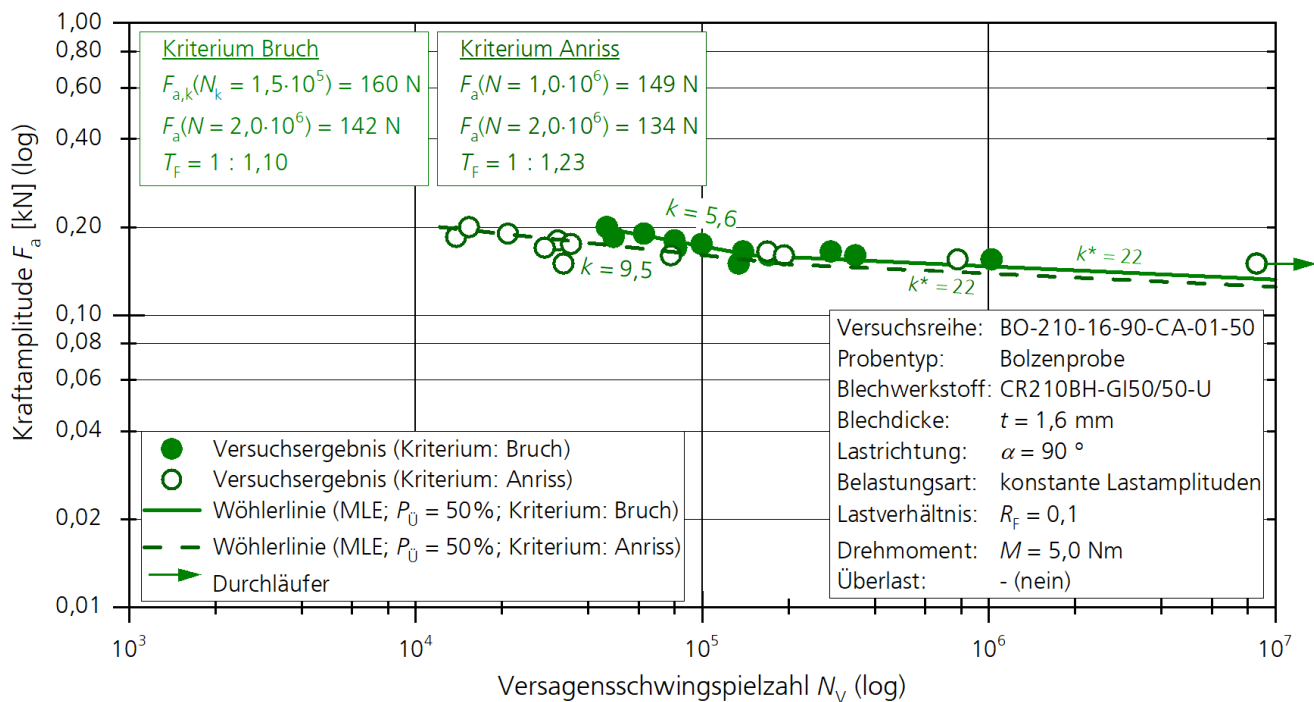


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	CR210-16 019 B	5,0		5,0	185	49.048	13.836	
2	CR210-16 018 B	5,0	1.991	5,0	180	80.032	31.294	
3	CR210-16 017 B	5,0	1.815	5,0	170	81.036	28.177	
4	CR210-16 015 B	5,0	1.697	5,0	175	99.565	34.823	
5	CR210-16 016 B	5,0		20,0	165	138.844	-	
6	CR210-16 013 B	5,0	1.967	5,0	165	280.922	168.712	
7	CR210-16 012 B	5,0	2.004	5,0	160	342.012	192.768	
8	CR210-16 009 B	5,0	1.780	5,0	160	170.386	77.739	
9	CR210-16 011 B	5,0	2.206	5,0	155	1.022.893	778.194	
10	CR210-16 005 B	5,0	1.029	5,0	150	133.988	32.797	
11	CR210-16 006 B	5,0		5,0	190	62.547	20.985	
12	CR210-16 007 B	5,0		5,0	200	46.455	15.339	
13	CR210-16 008 B	5,0		5,0	150	8.600.000	-	Durchläufer

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

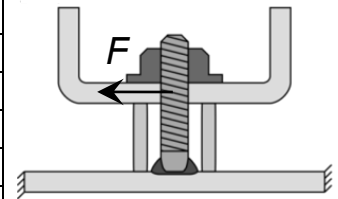
--	--	--	--	--	--	--	--



Steifigkeitsverläufe (exemplarisch)

13. Versuchsreihe BO-700-16-90-CA-01-40

Versuchsreihenbezeichnung	BO-700-16-90-CA-01-40
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR700Y980T-DP-EG50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	4,0
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

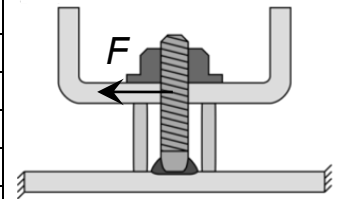
Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	CR700-16_234 B	4,0	2207	5	200	7.000.000	-	
2	CR700-16_249 B	4,0		5	350	91.171		
3	CR700-16_242 B	4,0	2210	5	400	12.655	2.032	
4	CR700-16_226 B	4,0		5	375	19.411		
5	CR700-16_225 B	4,0		5	325	35.998		
6	CR700-16_239 B	4,0		5	300	50.734		

Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

--	--	--	--	--	--	--	--	--

14. Versuchsreihe BO-700-16-90-CA-01-80

Versuchsreihenbezeichnung	BO-700-16-90-CA-01-80
Probentyp	Bolzenprobe
Blechwerkstoff	CR700Y980T-DP-EG50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Anzugsmoment M_A [Nm]	8,0
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagens der Bolzenschweißverbindung

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [N]	f [Hz]	F_a [N]	N_B [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	CR700-16_252_B	8,0	4746	5	400	102.763	64680	
2	CR700-16_229_B	8,0	3564	5	450	11.455	2468	
3	CR700-16_nnn_B	8,0	0	5	350	offen		
4	CR700-16_230_B	8,0	5346	5	425	74.558	48690	
5	CR700-16_238_B	8,0	2389	5	385	19.466		
6	CR700-16_232_B	8,0	4343	5	395	221.882	162888	
7	CR700-16_236_B	8,0	4171	5	375	107.417		
8	CR700-16_248_B	8,0	2450	5	410	15.527		
9	CR700-16_231_B	8,0		5	362,5	103.876		
10	CR700-16_240_B	8,0		5	437,5	15.973		
11	CR700-16_235_B	8,0		5	390	25.843		

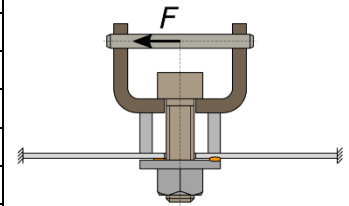
Versuchsergebnisse außerhalb der Auswertung mit abweichendem Anzugsmoment/Versagensort

1	CR700-16_247_B	8,0	4887	5	375			unterbrochen bei 435000
2	CR700-16_237_B			10	390			
3	CR700-16_241_B			10	390			
4	CR700-16_221_B			10	375			
5	CR700-16_233_B	8,0	2304	20	390	22.450		

B. Anhang Schwingfestigkeitsergebnisse Mutterproben

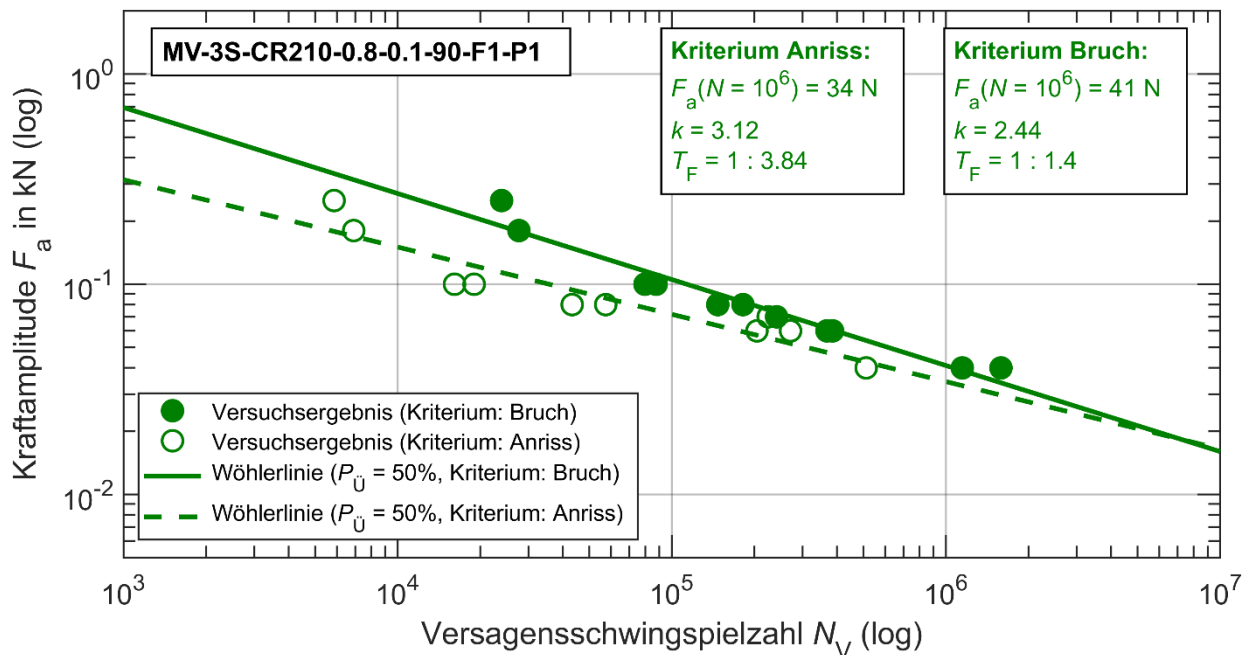
1. Versuchsreihe MV-3S-CR210-0.8-0.1-90-F1-P1

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR210-0.8-0.1-90-F1-P1
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	0° (P1)
Überlast	- (nein)

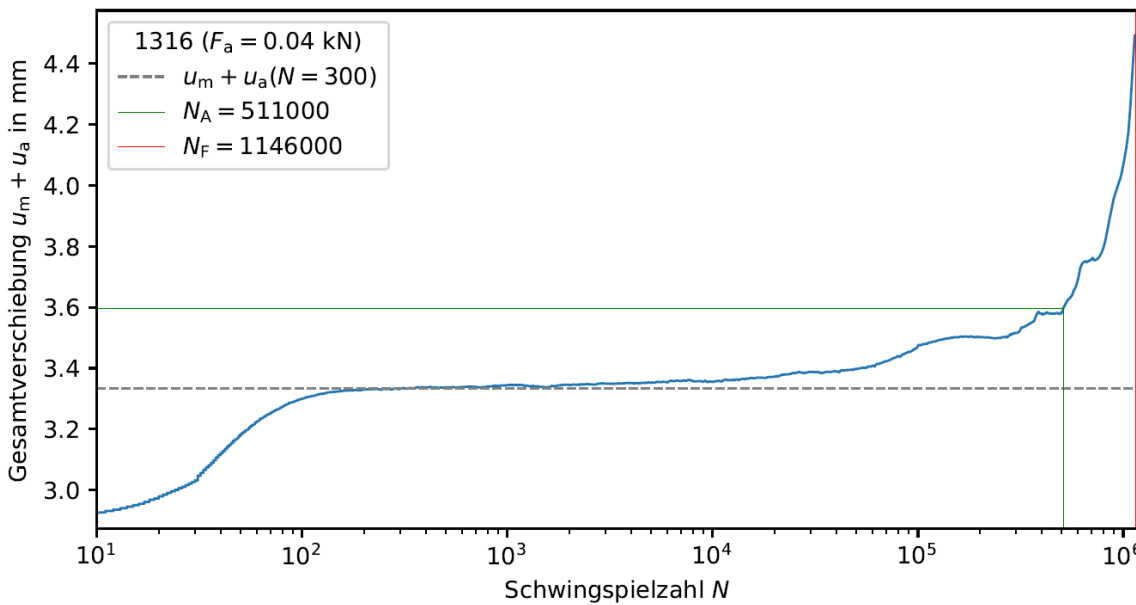
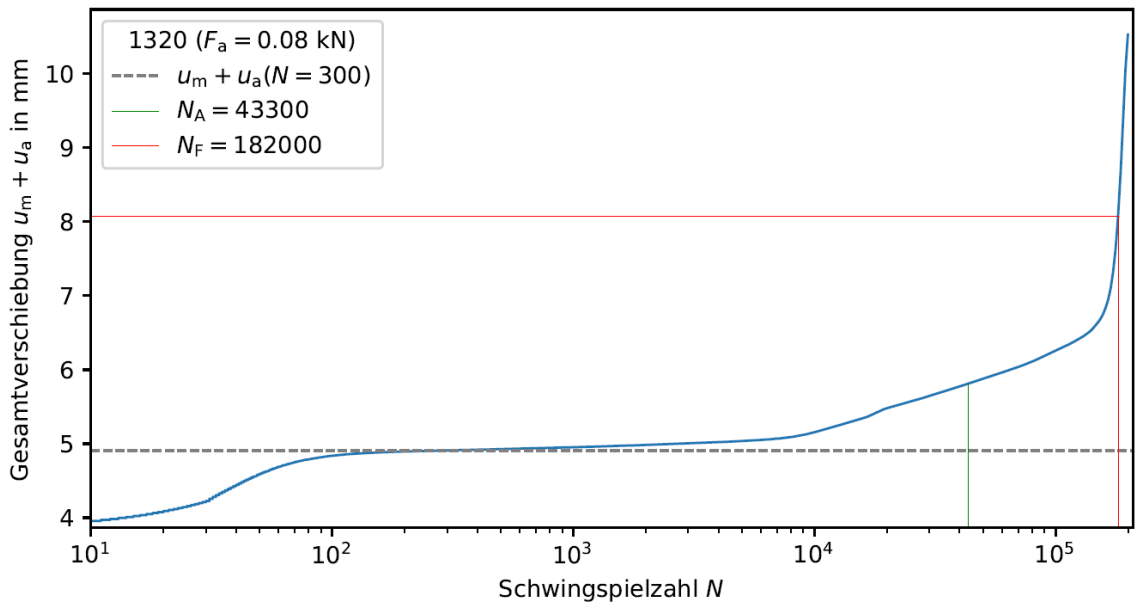
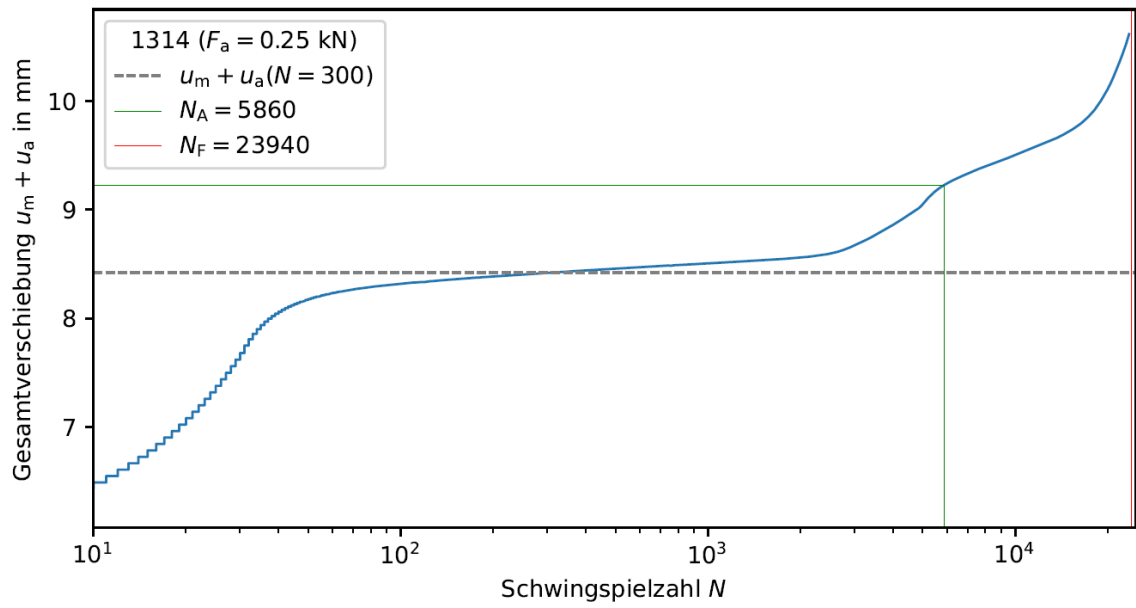


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1314	27	14	3	250	23937	5865	$N_f: u_{\max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1306	27	14	3	180	27693	6915	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1307	27	14	3	100	79787	16124	
4	1305	27	14	3	100	87656	19009	
5	1317	27	14	3	80	147046	57406	
6	1320	27	14	3	80	181705	43292	
7	1310	27	14	3	70	240944	224532	
8	1309	27	14	3	60	385623	204375	
9	1313	27	14	3	60	367907	271005	
10	1316	27	14	3	40	1146303	511343	
11	1315	27	14	3	40	1585924	511343	

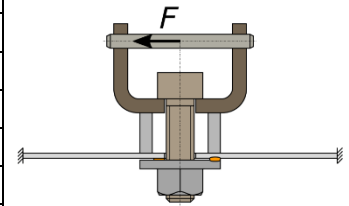


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



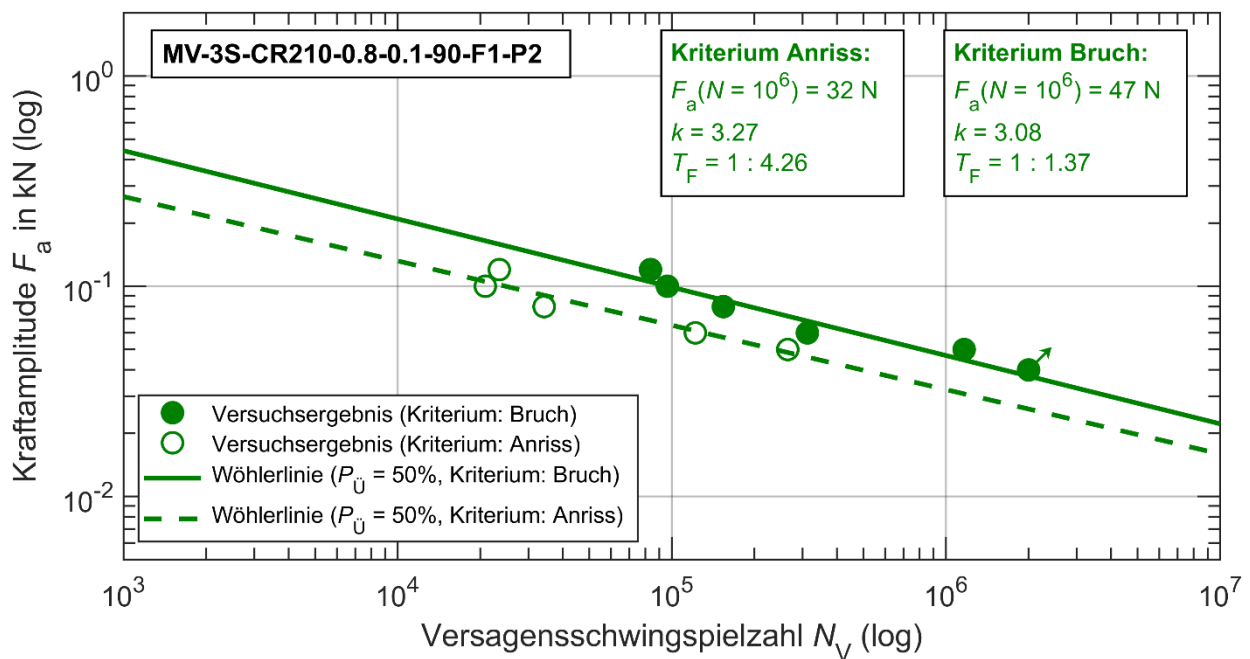
2. Versuchsreihe MV-3S-CR210-0.8-0.1-90-F1-P2

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR210-0.8-0.1-90-F1-P2
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	180° (P2)
Überlast	- (nein)

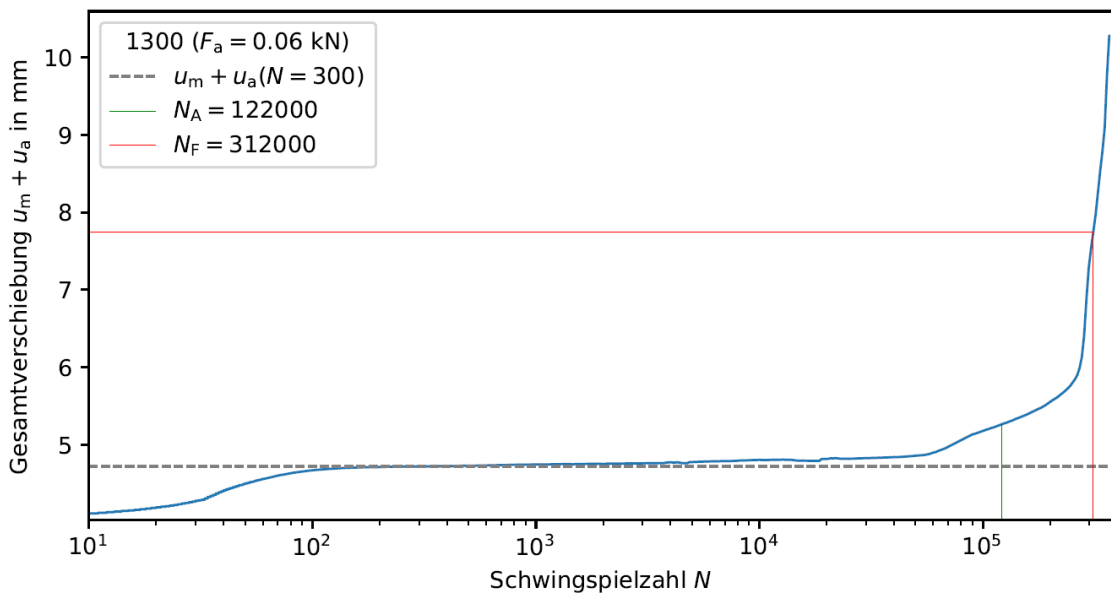
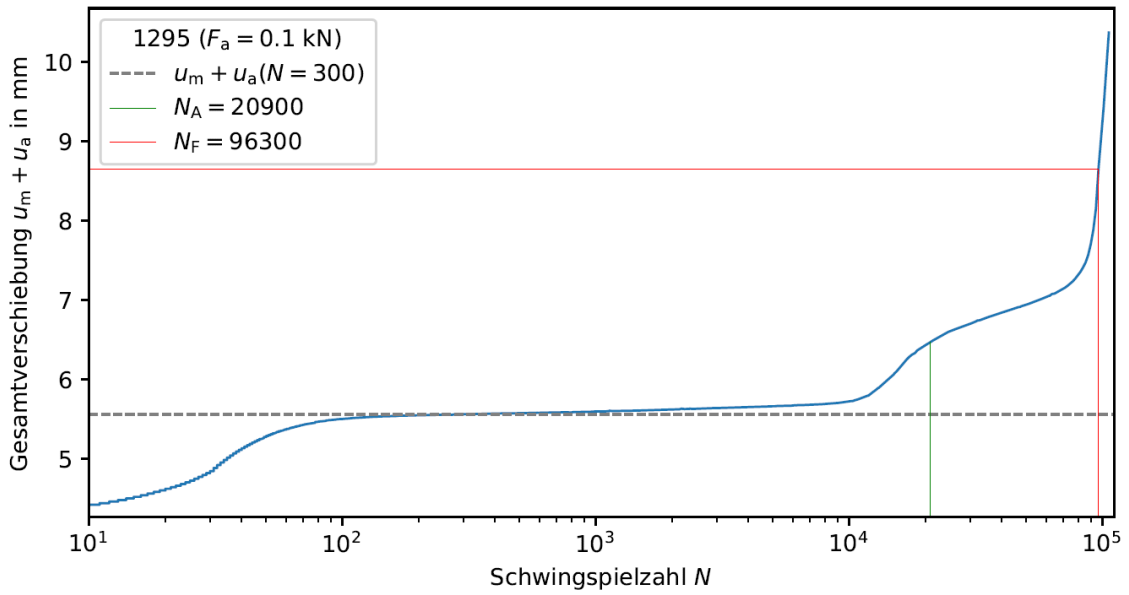
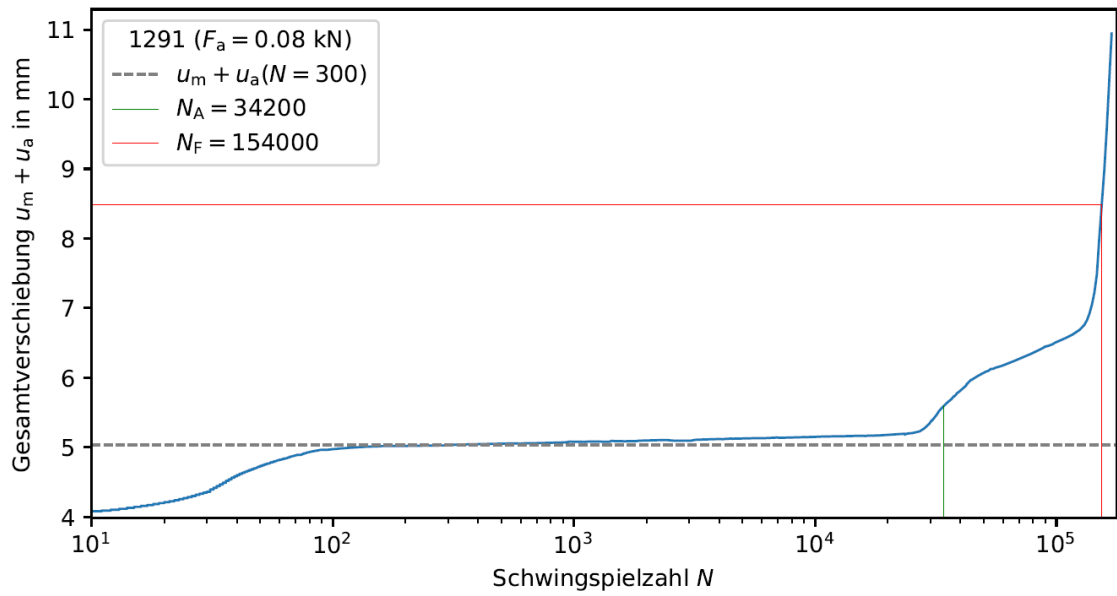


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1297	27	14	3	120	83628	23489	$N_f: u_{\max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1295	27	14	3	100	96300	20884	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1291	27	14	3	80	154126	34219	
4	1300	27	14	3	60	312069	121829	
5	1299	27	14	3	50	1164515	264706	
6	1303	27	14	3	40	2000000	2000000	Durchläufer

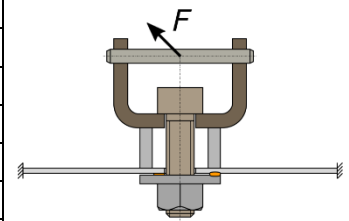


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



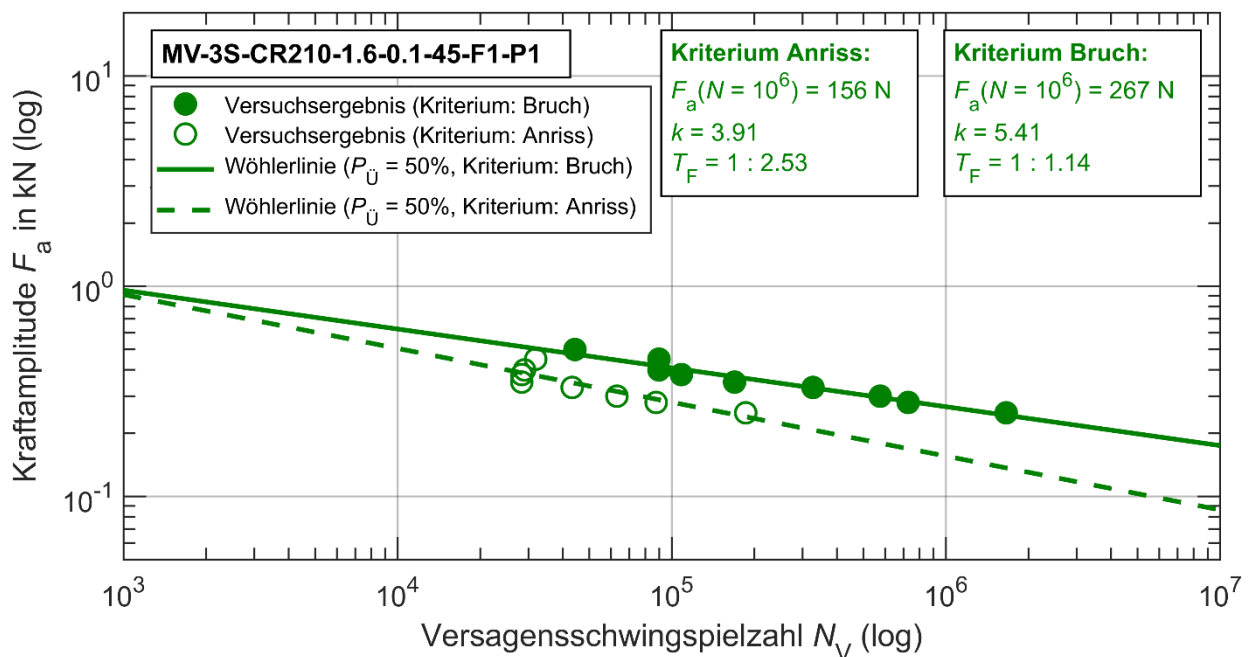
3. Versuchsreihe MV-3S-CR210-1.6-0.1-45-F1-P1

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR210-1.6-0.1-45-F1-P1
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	45
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	0° (P1)
Überlast	- (nein)

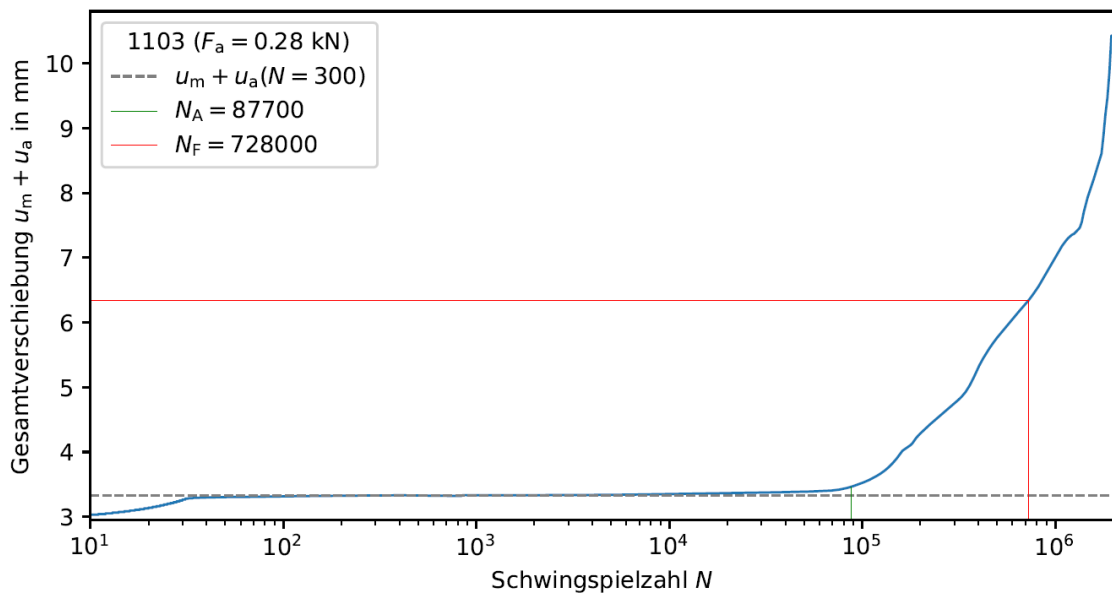
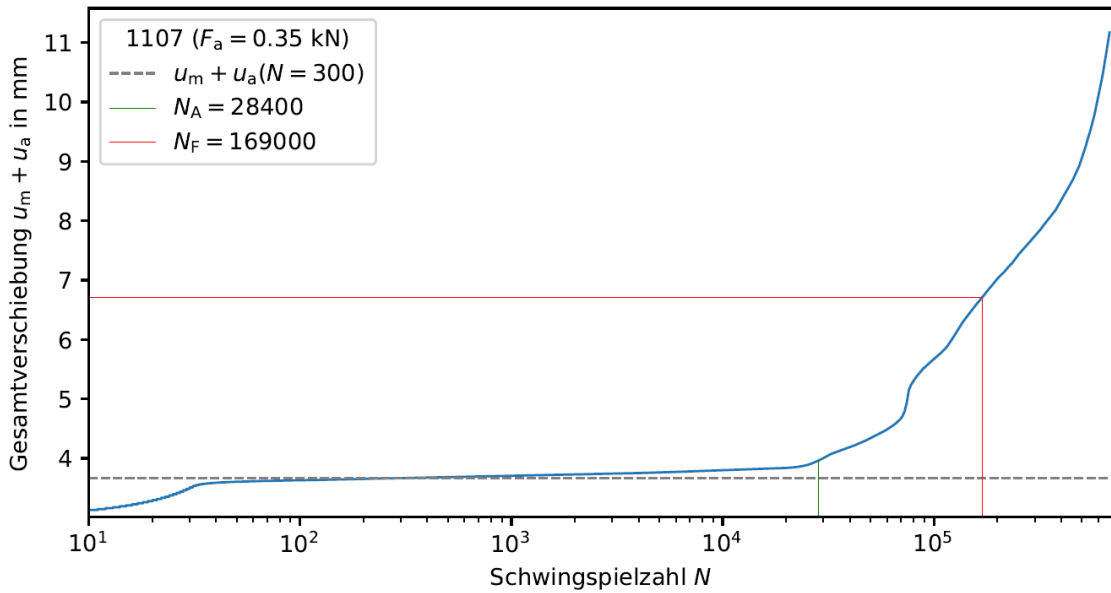
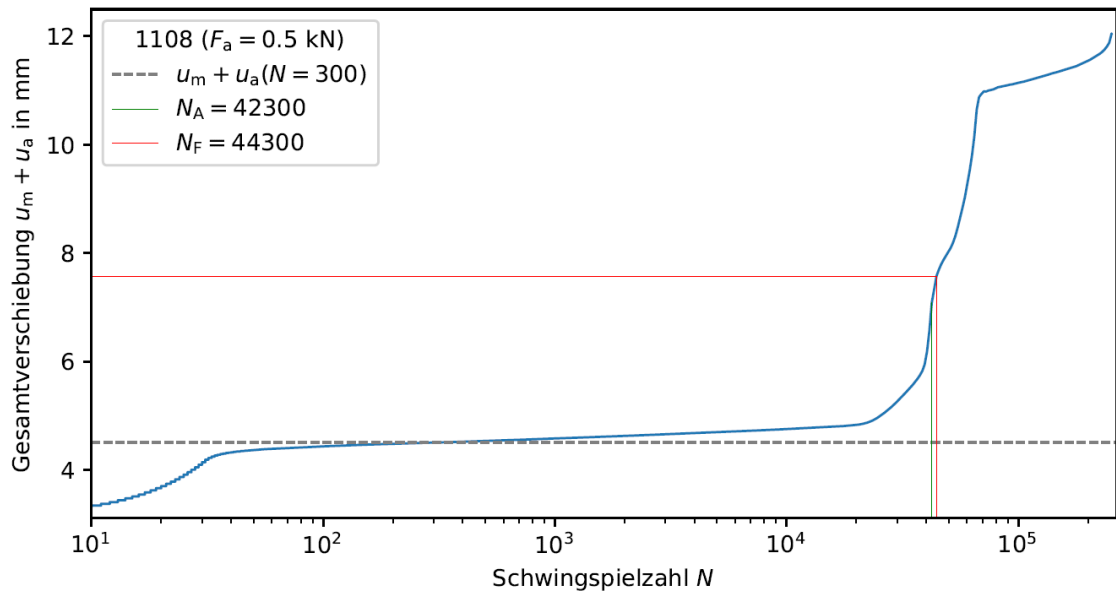


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1108	27	14	3	500	44322	-	$N_f: u_{\max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1118	27	14	3	450	89741	31889	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1113	27	14	3	400	89741	29026	
4	1114	27	14	3	380	108316	28352	
5	1107	27	14	3	350	169328	28352	
6	1105	27	14	3	330	327097	43292	
7	1104	27	14	3	300	575140	63067	
8	1103	27	14	3	280	727608	87656	
9	1102	27	14	3	250	1657032	186028	

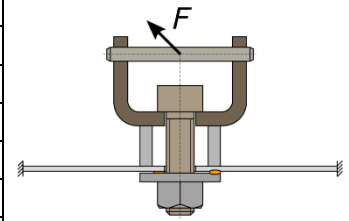


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



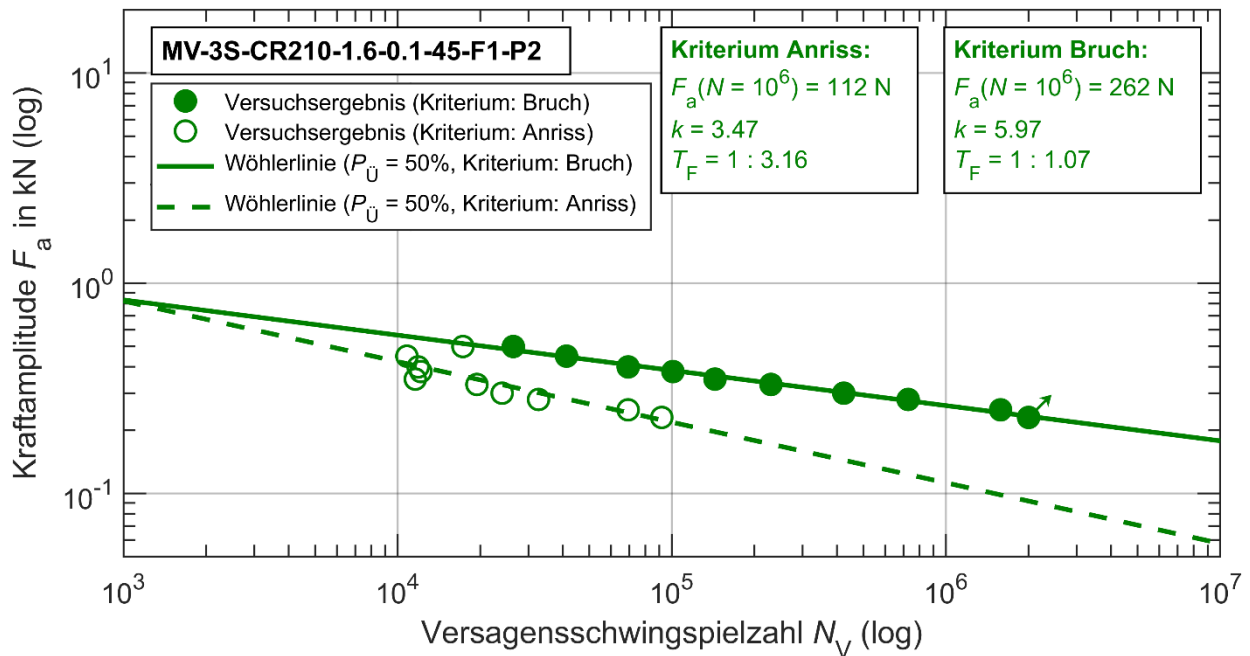
4. Versuchsreihe MV-3S-CR210-1.6-0.1-45-F1-P2

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR210-1.6-0.1-45-F1-P2
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	45
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	180° (P2)
Überlast	- (nein)

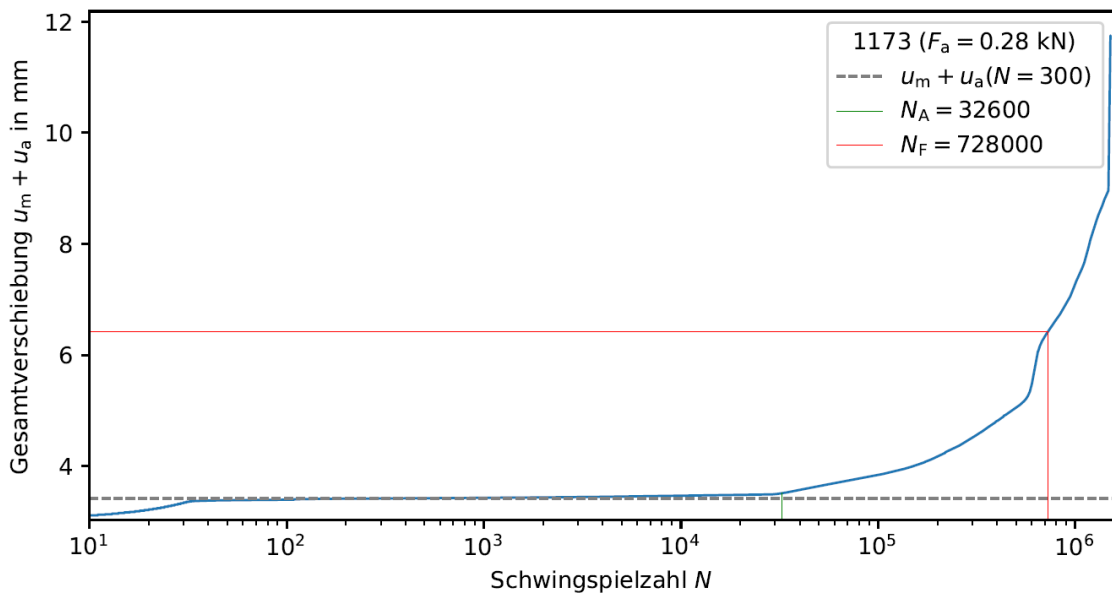
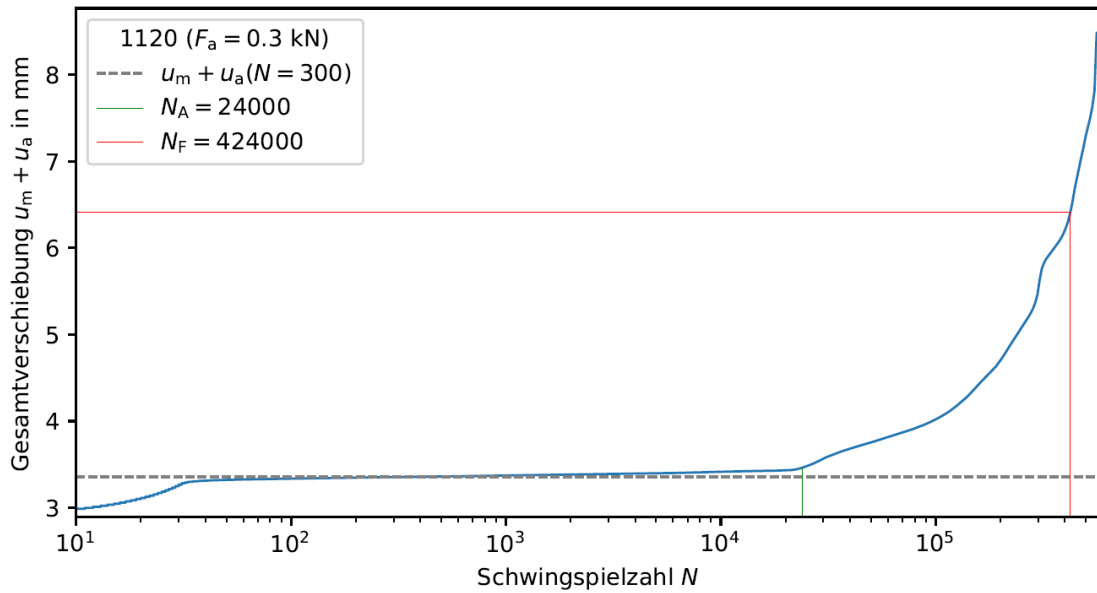
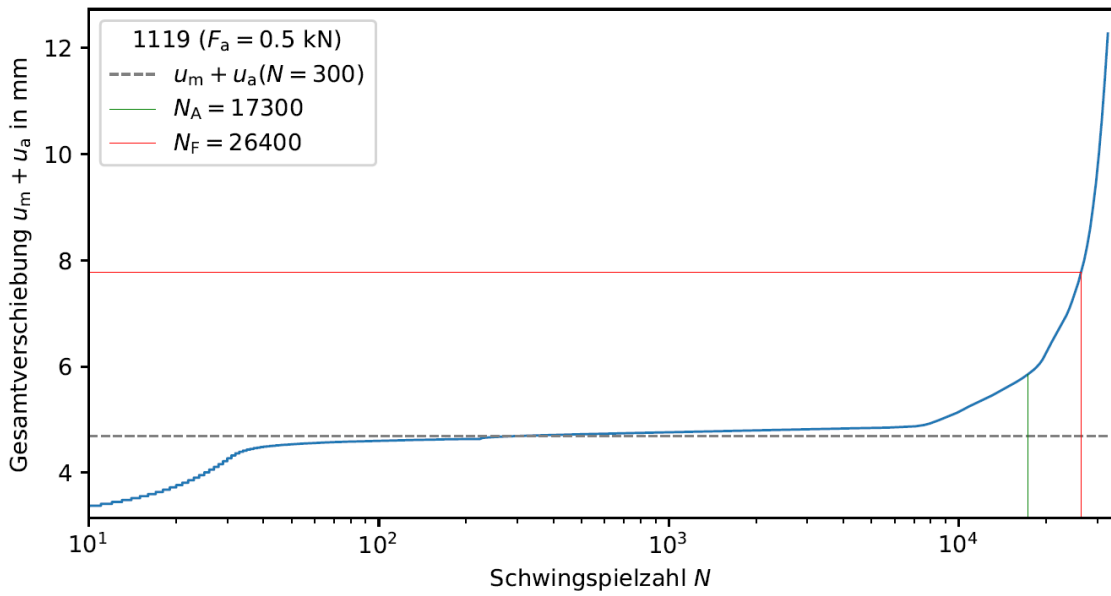


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1119	27	14	3	500	26420	17302	$N_f: u_{max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1111	27	14	3	450	41303	10810	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1110	27	14	3	400	69288	11877	
4	1112	27	14	3	380	100938	12159	
5	1120	27	14	3	350	143629	11601	
6	1121	27	14	3	330	229874	19461	
7	1172	27	14	3	300	423655	24048	
8	1173	27	14	3	280	727608	32648	
9	1174	27	14	3	250	1580906	69288	
10	1171	27	14	3	230	2000000	91877	Durchläufer

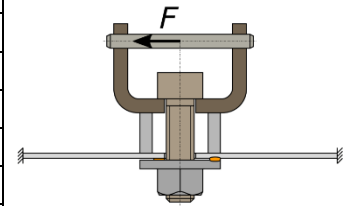


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



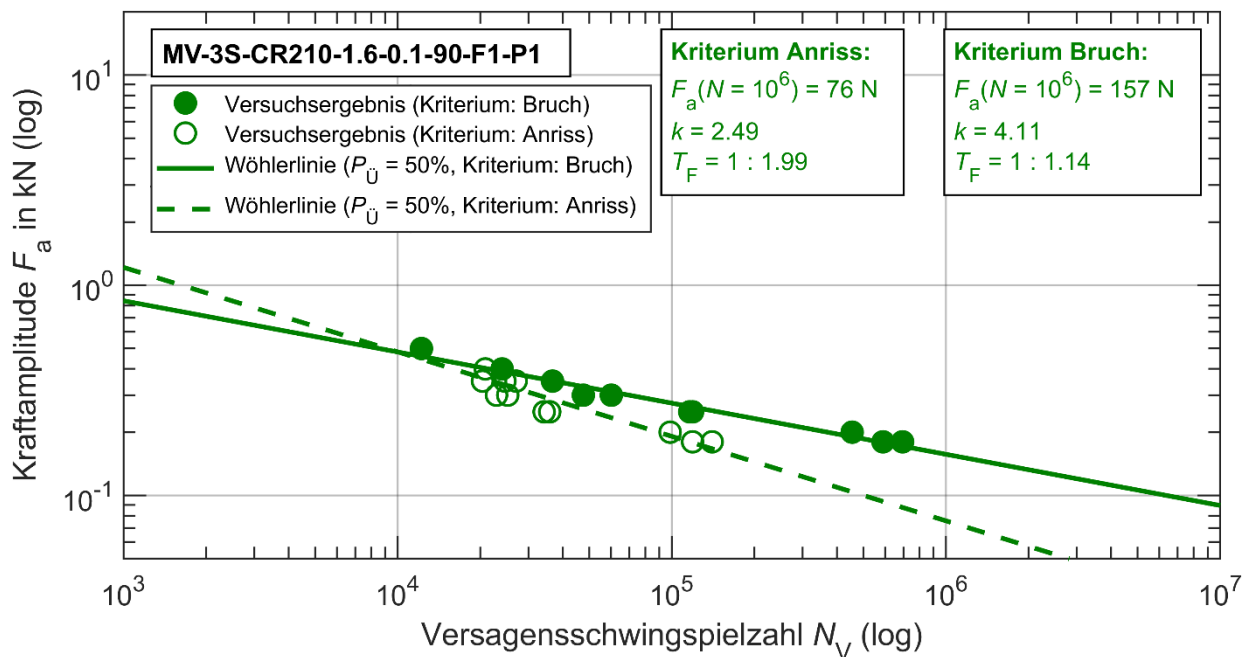
5. Versuchsreihe MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P1

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P1
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	0° (P1)
Überlast	- (nein)

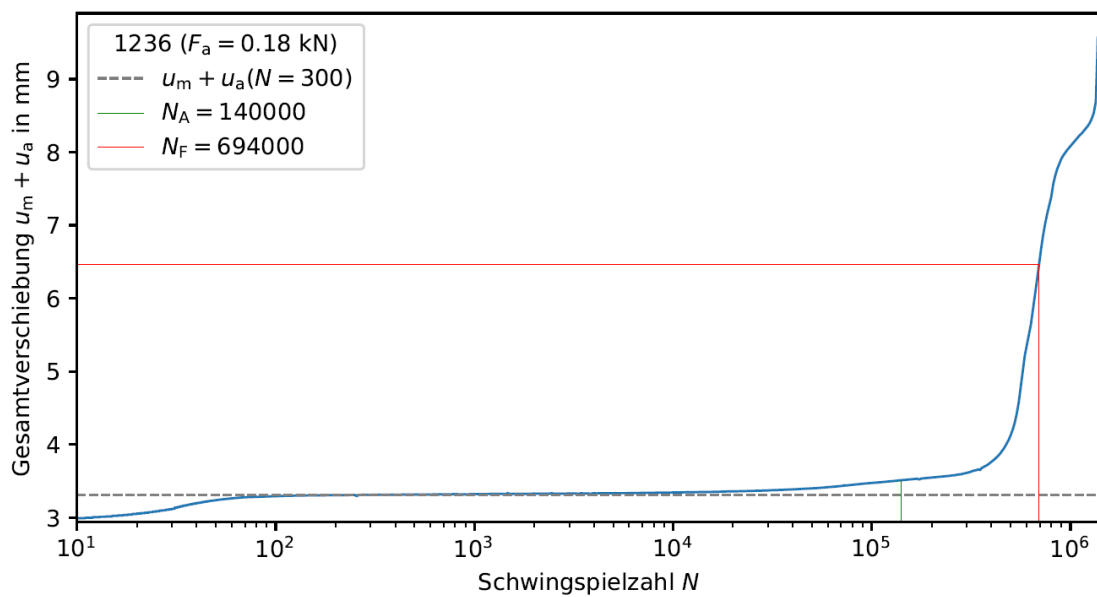
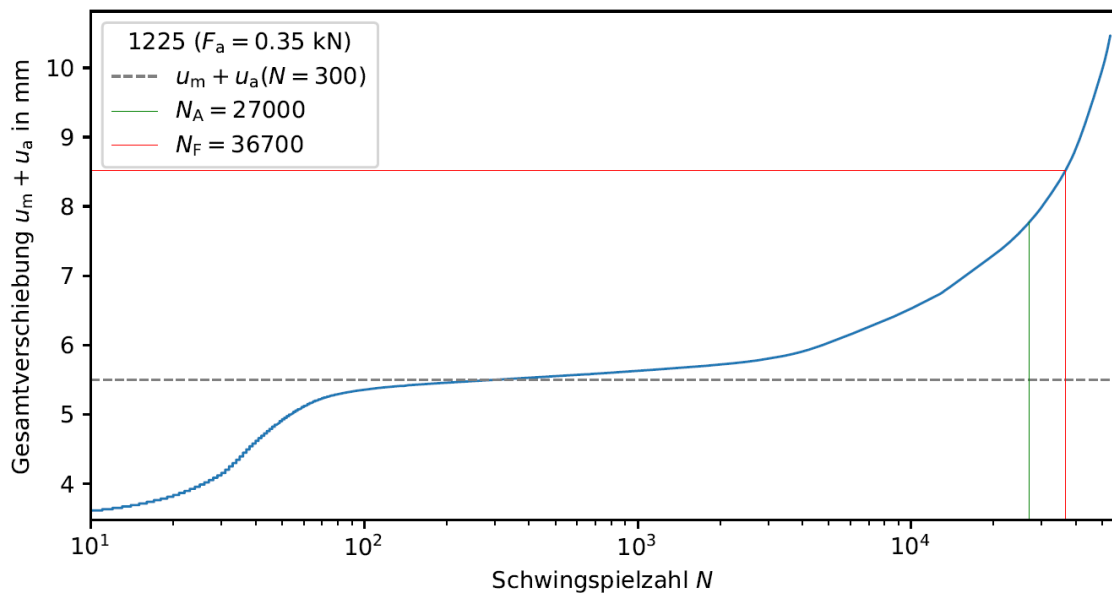
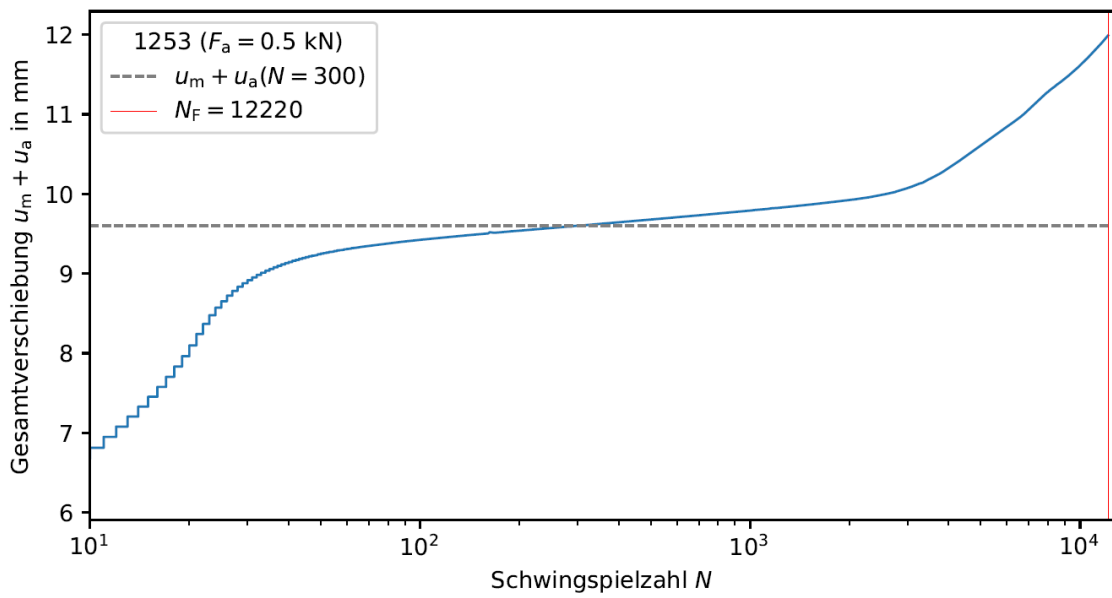


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1253	27	14	3	500	12216	12216	$N_f: u_{max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1244	27	14	3	400	24048	20884	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1053	27	14	3	400	24048	20884	
4	1235	27	14	3	350	36721	24621	
5	1245	27	14	3	350	36721	20398	
6	1225	27	14	3	350	36721	27049	
7	1051	27	14	3	300	47561	22944	
8	1056	27	14	3	300	60170	25207	
9	1057	27	14	3	250	118999	34220	
10	1243	27	14	3	250	116233	35868	
11	1258	27	14	3	200	454621	98592	
12	1237	27	14	3	180	588825	118999	
13	1236	27	14	3	180	694181	140291	

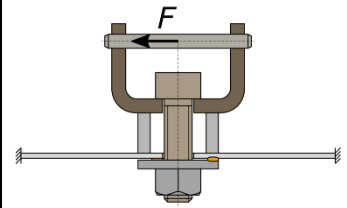


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



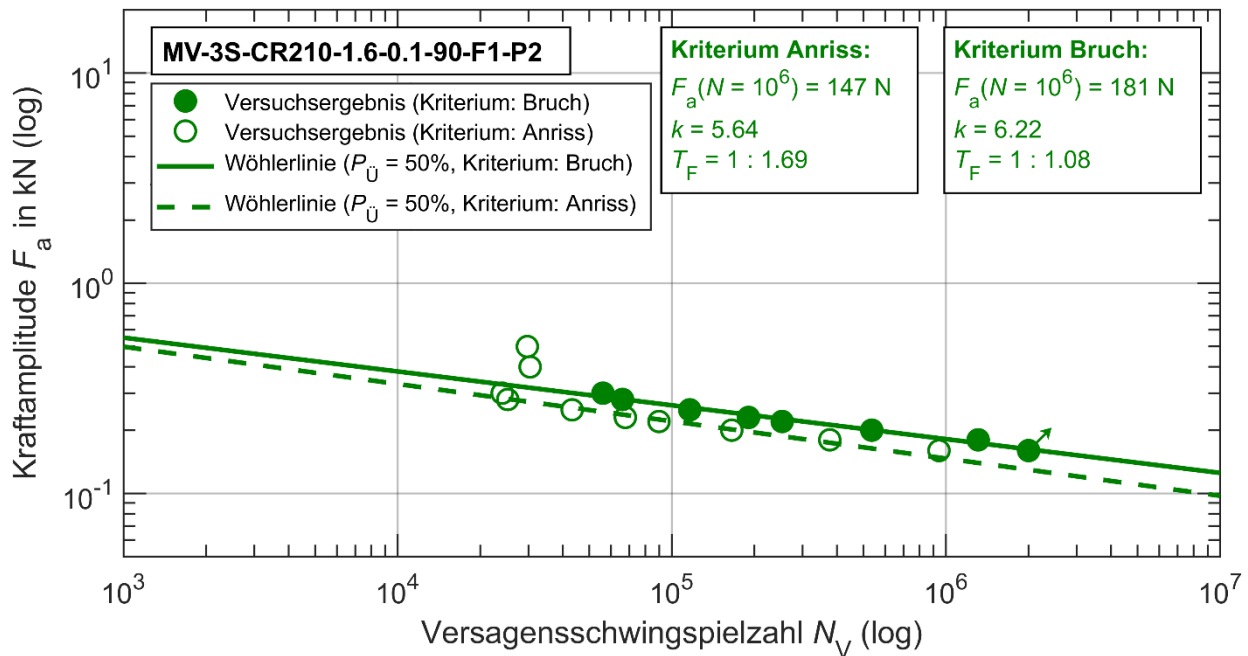
6. Versuchsreihe MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P2

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P2
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	180° (P2)
Überlast	- (nein)

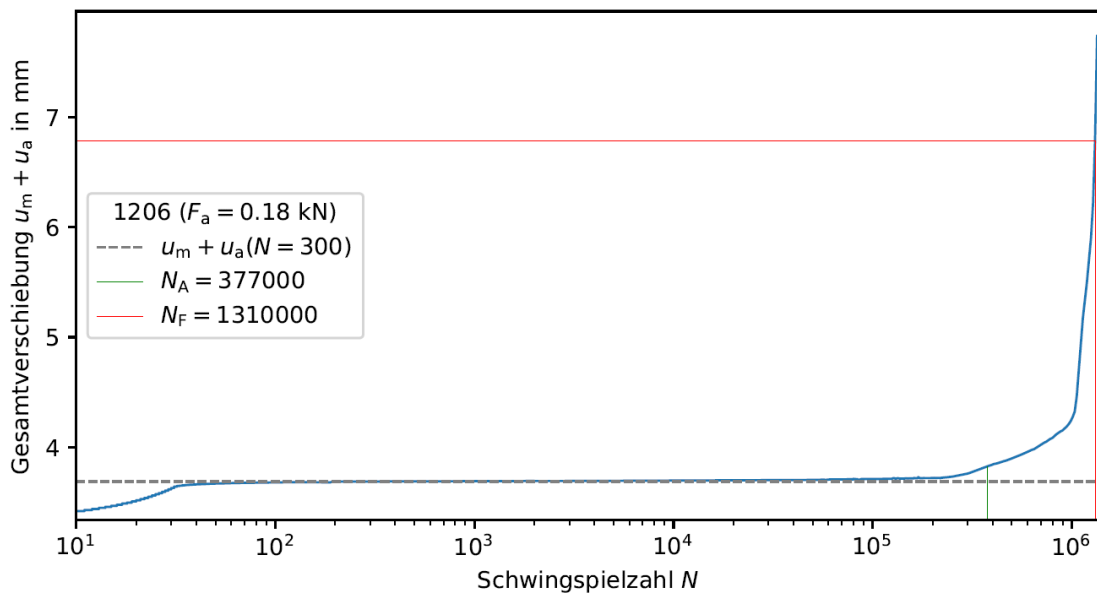
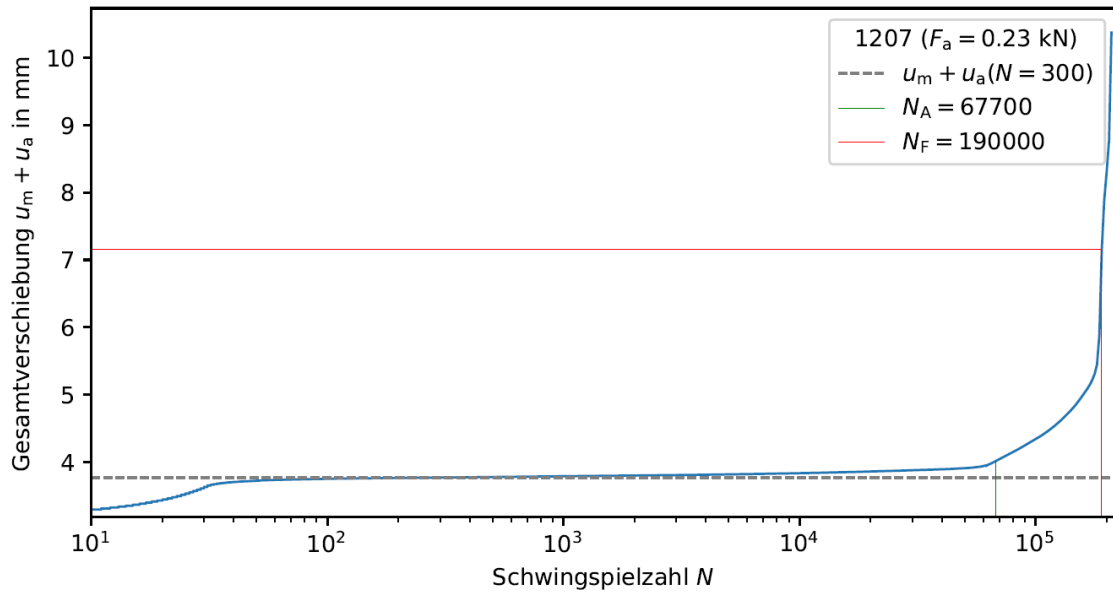
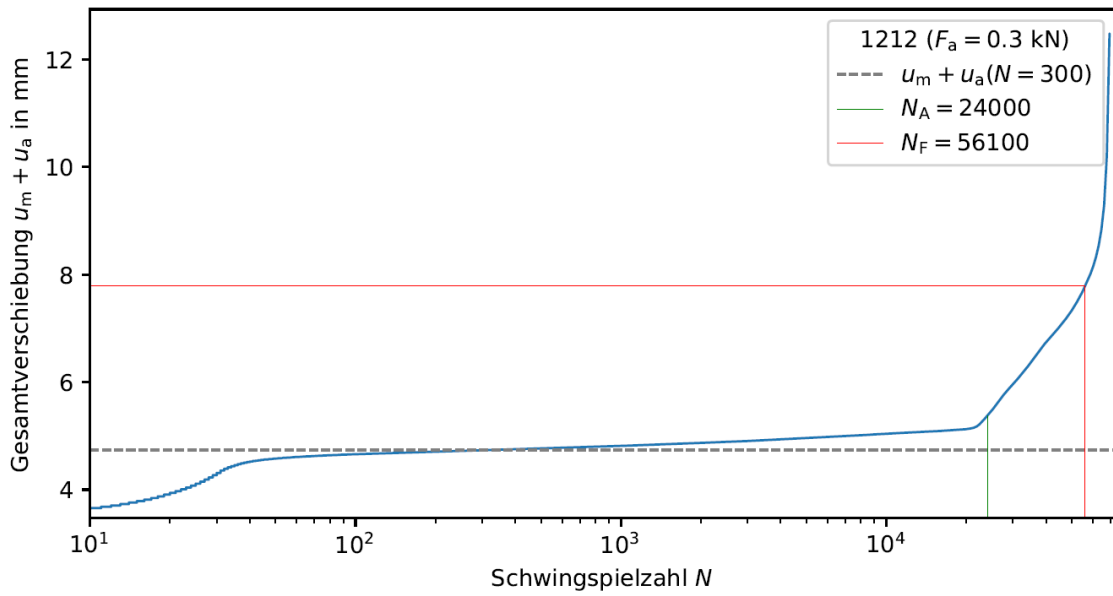


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1209	27	14	3	500	-	29717	$N_f: u_{max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1208	27	14	3	400	-	30424	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1212	27	14	3	300	56072	24048	
4	1203	27	14	3	280	66104	25207	
5	1211	27	14	3	250	116233	43292	
6	1207	27	14	3	230	190454	67677	
7	1204	27	14	3	220	252546	89741	
8	1205	27	14	3	200	535965	165393	
9	1206	27	14	3	180	1309806	376661	
10	1210	27	14	3	160	2000000	942397	Durchläufer

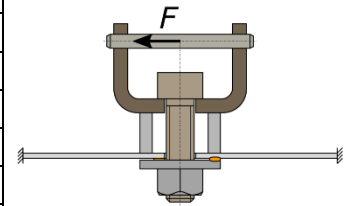


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



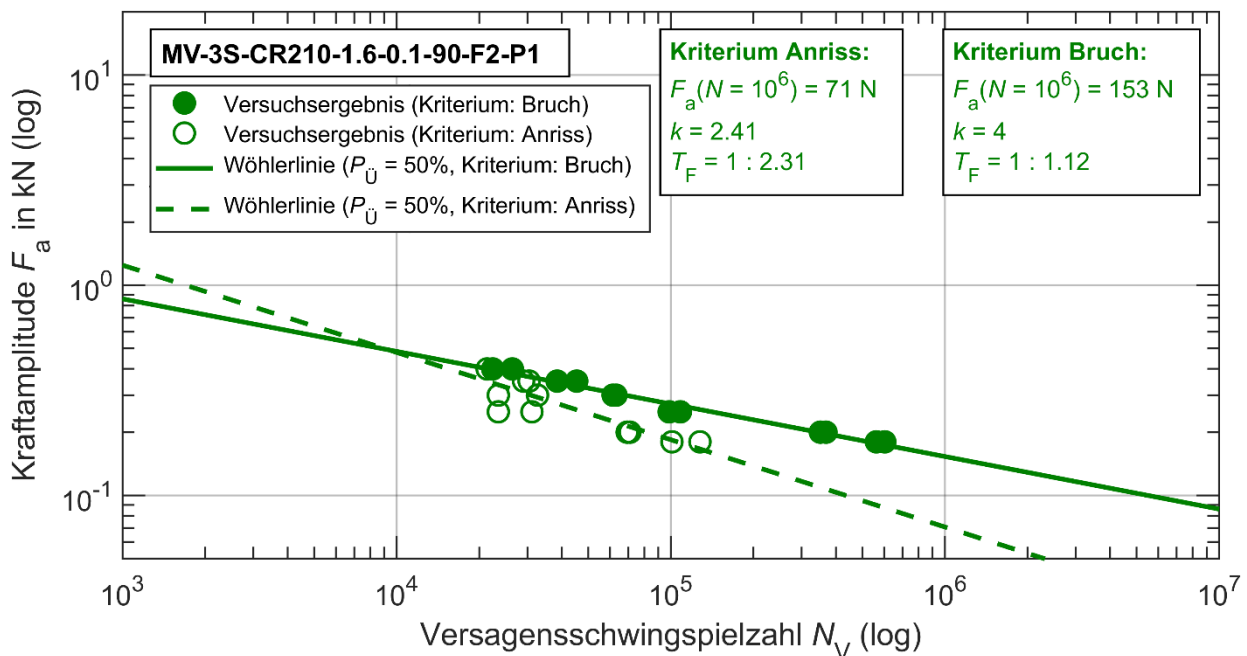
7. Versuchsreihe MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F2-P1

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F2-P1
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	10 (F2)
Position ggü. Lastachse	0° (P1)
Überlast	- (nein)

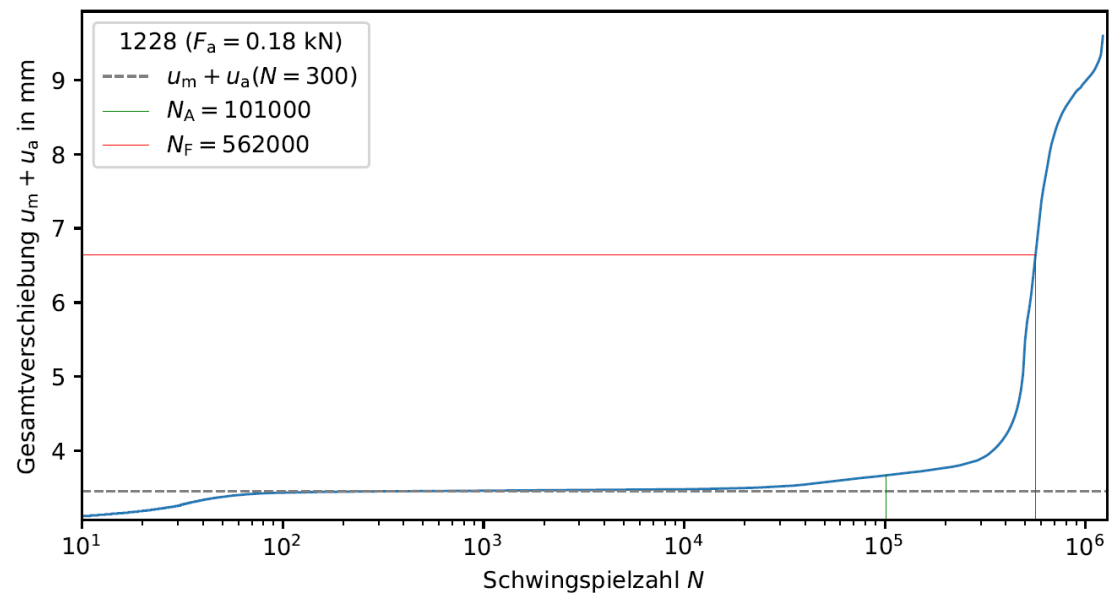
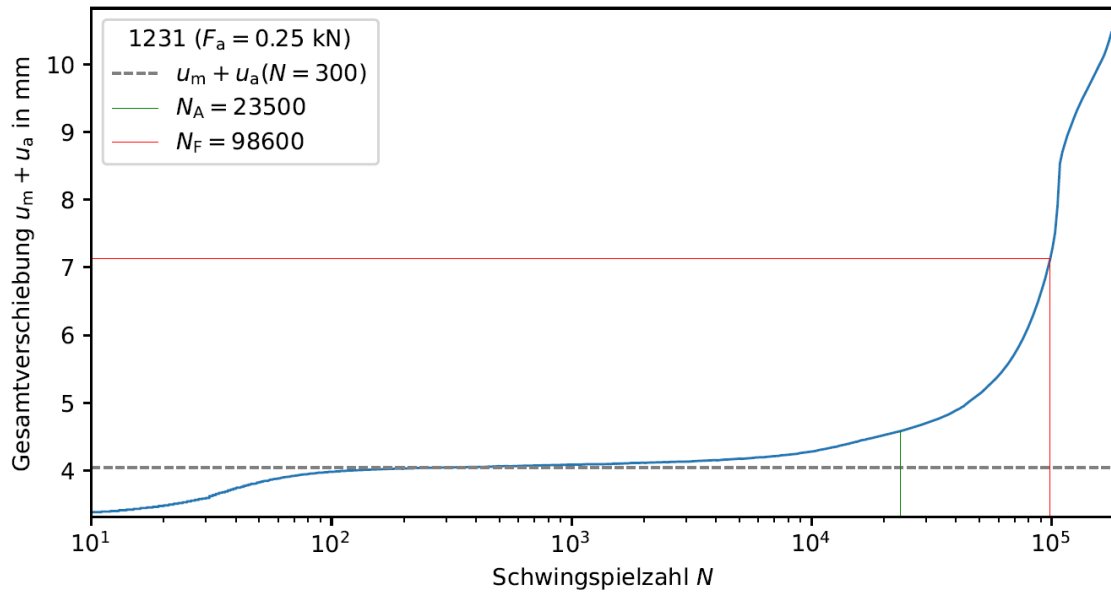
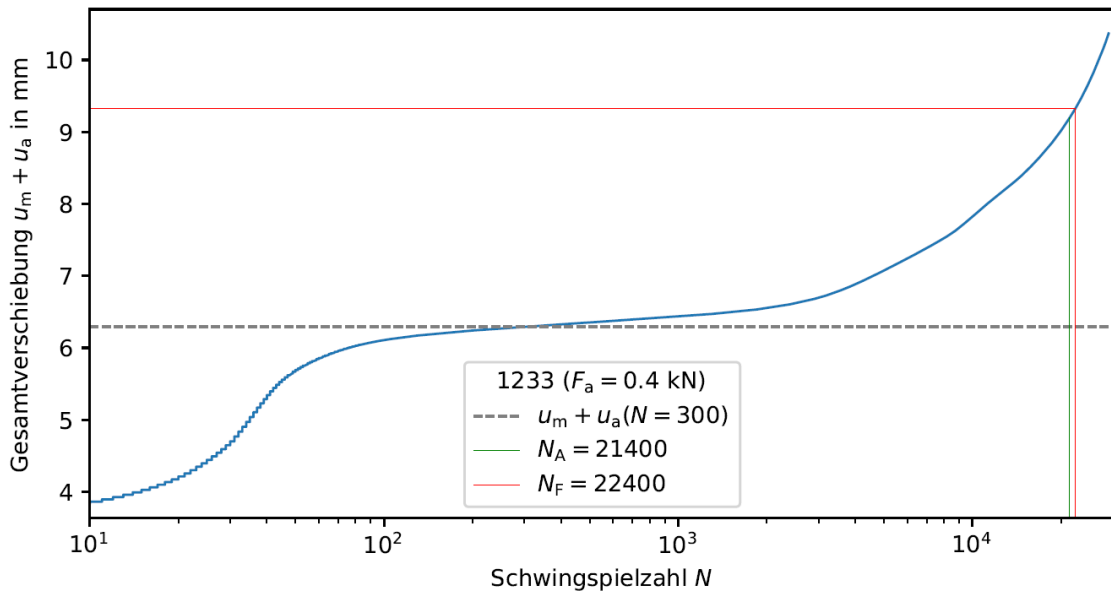


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1233	22	10	3	400	22410	21381	$N_f: u_{max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1058	22	10	3	400	26420	26420	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1052	22	10	3	350	38489	29026	
4	1234	22	10	3	350	45376	30424	
5	1226	22	10	3	300	61602	32648	
6	1223	22	10	3	300	63067	23490	
7	1231	22	10	3	250	98592	23490	
8	1230	22	10	3	250	108316	31148	
9	1229	22	10	3	200	367907	69288	
10	1232	22	10	3	200	351005	70936	
11	1054	22	10	3	180	602835	127697	
12	1228	22	10	3	180	561774	100938	

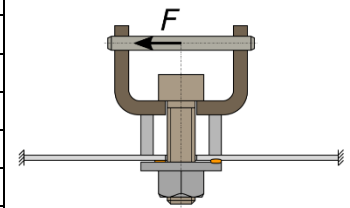


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



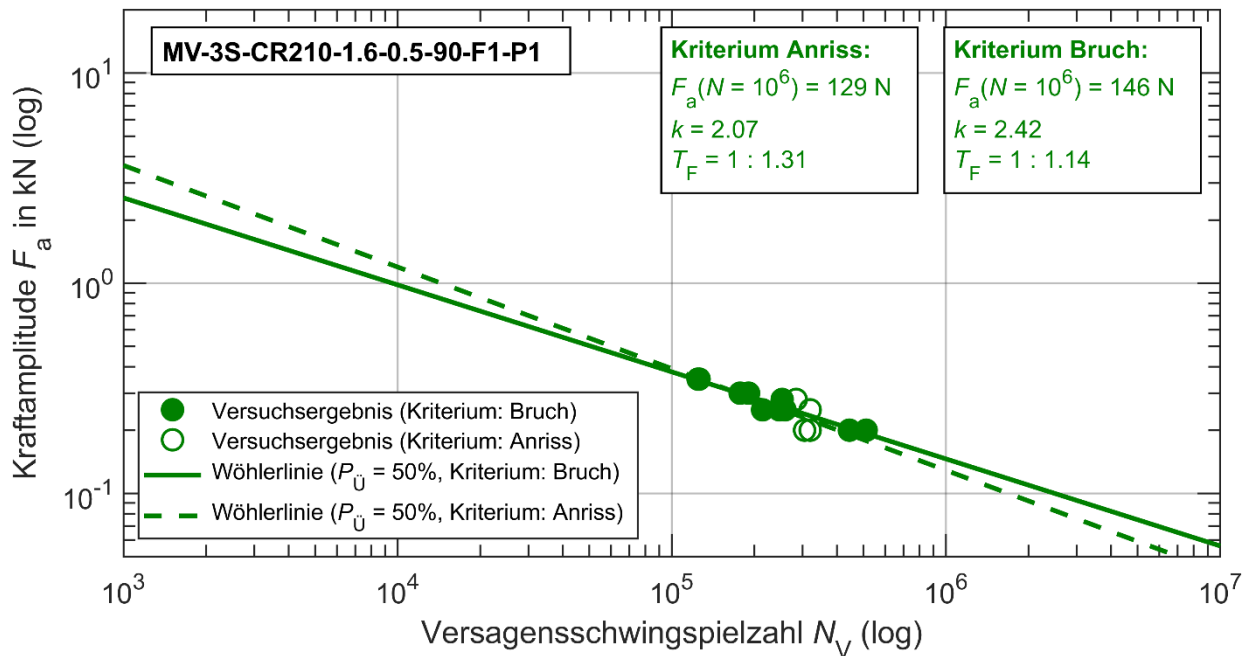
8. Versuchsreihe MV-3S-CR210-1.6-0.5-90-F1-P1

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR210-1.6-0.5-90-F1-P1
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,5
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	0° (P1)
Überlast	- (nein)

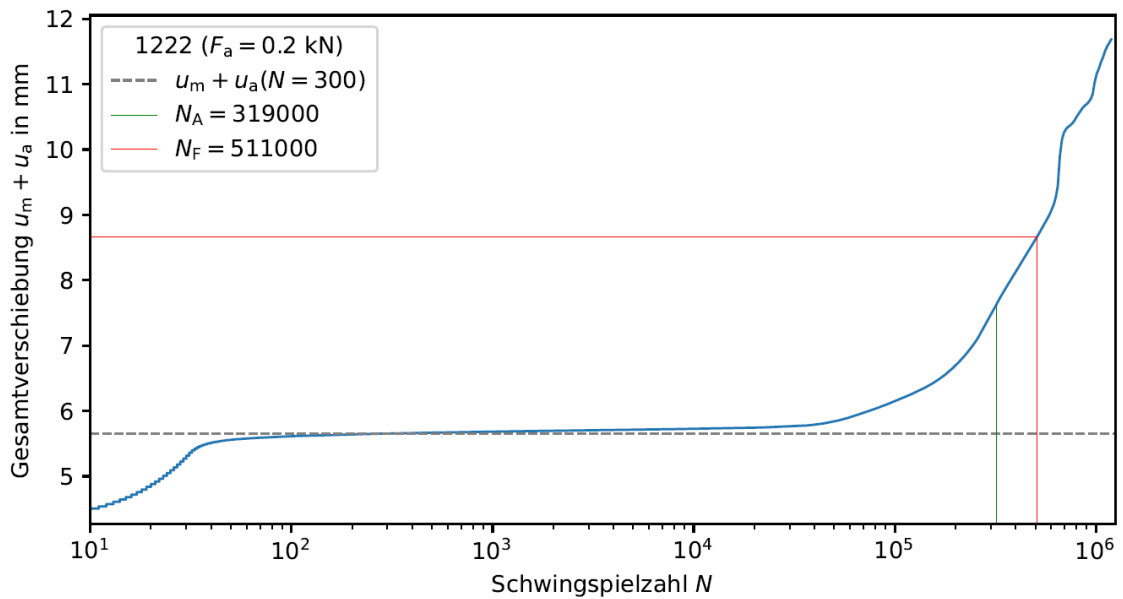
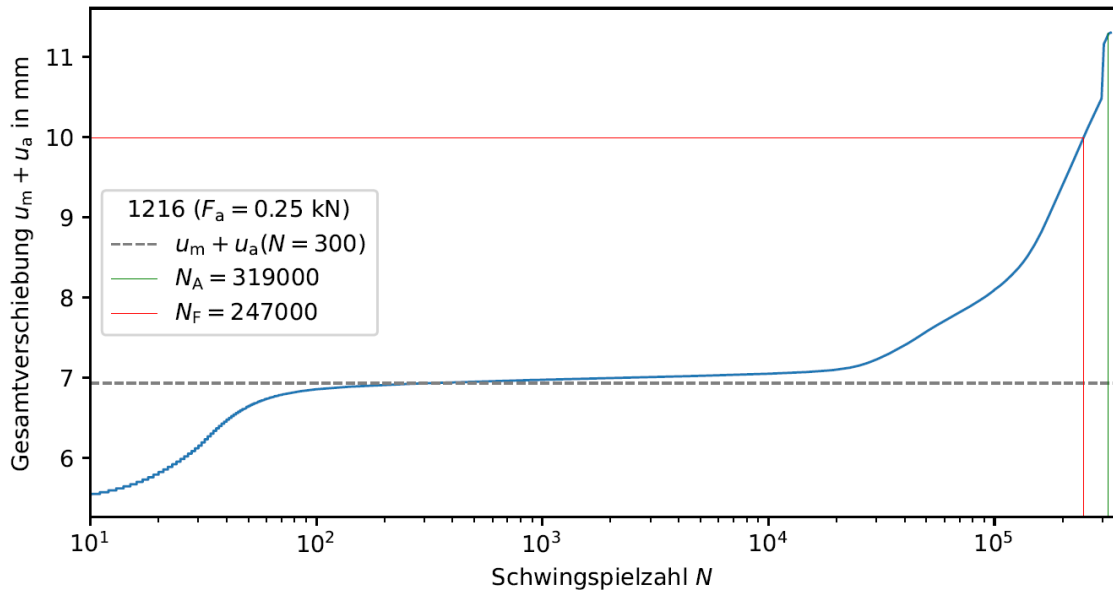
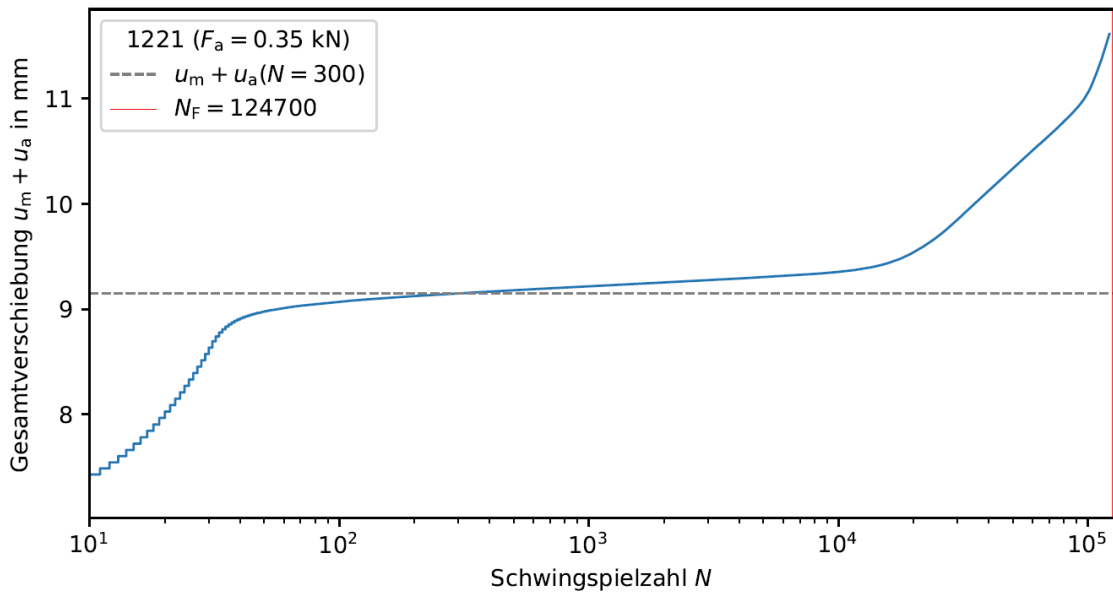


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1213	27	14	3	350	125755	125755	$N_f: u_{max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1221	27	14	3	350	124659	124659	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1218	27	14	3	300	177482	177482	
4	1214	27	14	3	300	190454	190454	
5	1217	27	14	3	280	252546	284055	
6	1224	27	14	3	250	214217	214217	
7	1216	27	14	3	250	246676	319495	
8	1215	27	14	3	250	258555	258555	
9	1220	27	14	3	200	444056	304817	
10	1222	27	14	3	200	511343	319495	

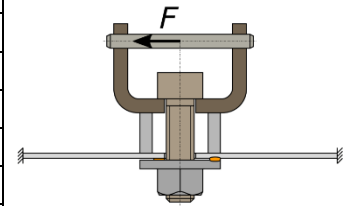


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



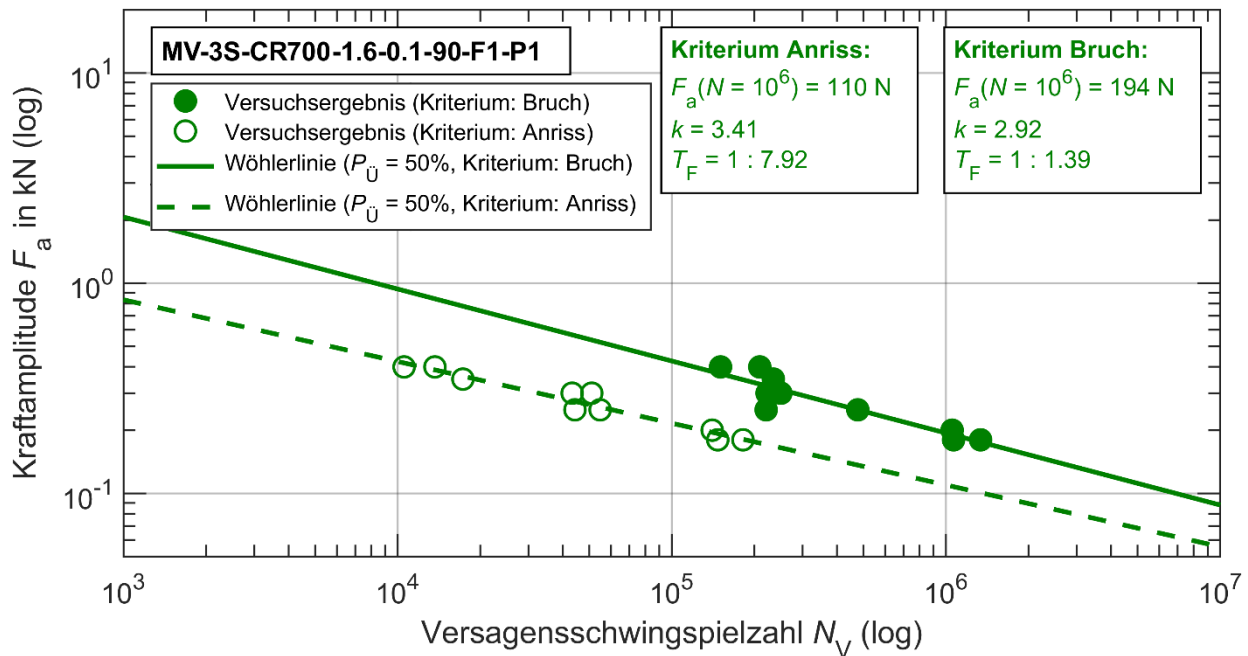
9. Versuchsreihe MV-3S-CR700-1.6-0.1-90-F1-P1

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR700-1.6-0.1-90-F1-P1
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR700Y980T-DP-EG50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	0° (P1)
Überlast	- (nein)

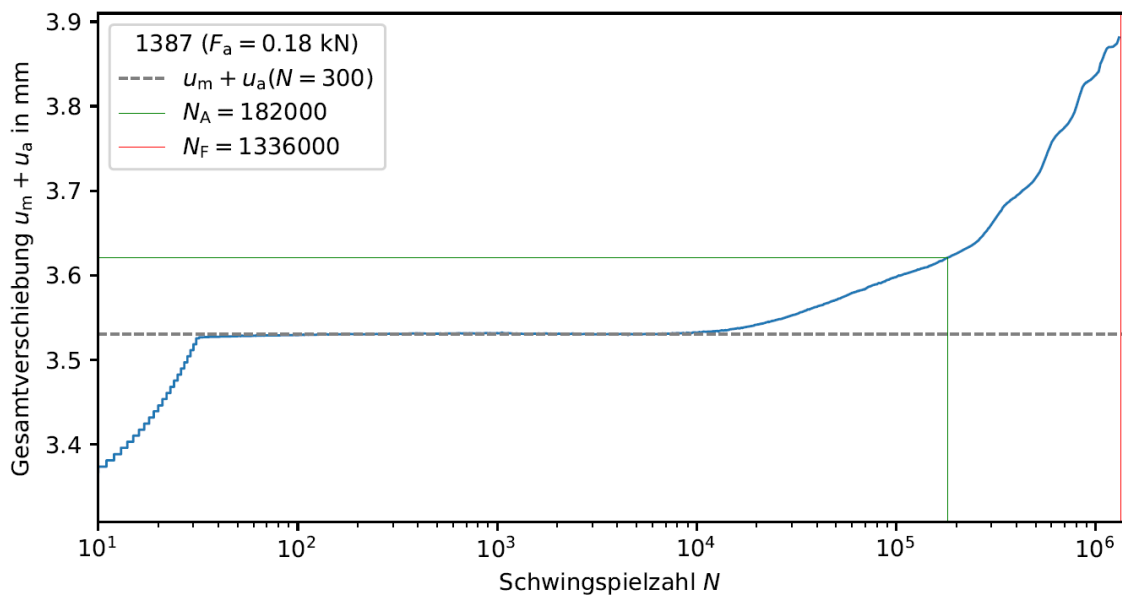
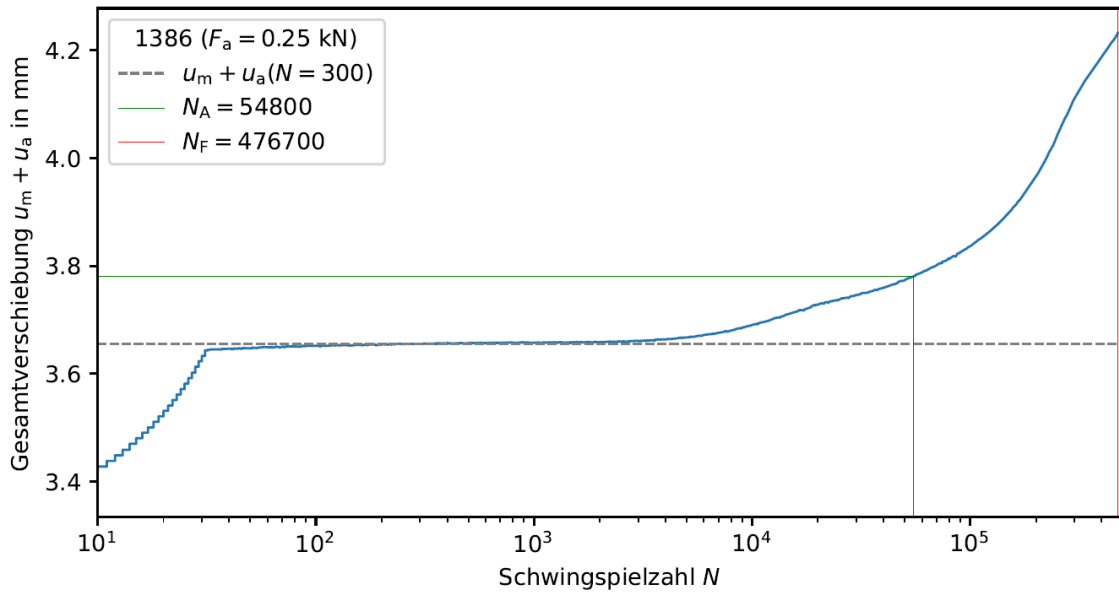
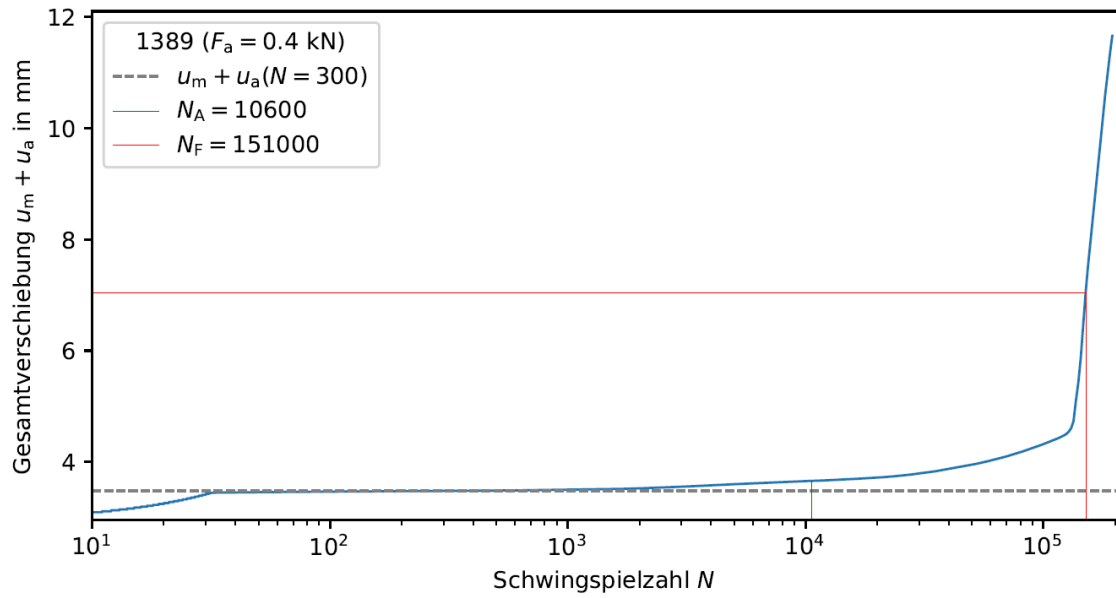


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1389	27	14	3	400	150545	10559	$N_f: u_{max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1382	27	14	3	400	209238	13677	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1388	27	14	3	350	234562	17302	
4	1383	27	14	3	300	222423	43292	
5	1077	27	14	3	300	249767	51038	
6	1386	27	14	3	250	476650	54768	
7	1390	27	14	3	250	220770	44322	
8	1061	27	14	3	200	1052427	140291	
9	1385	27	14	3	180	1065151	147046	
10	1387	27	14	3	180	1336433	181705	

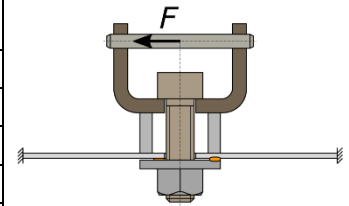


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



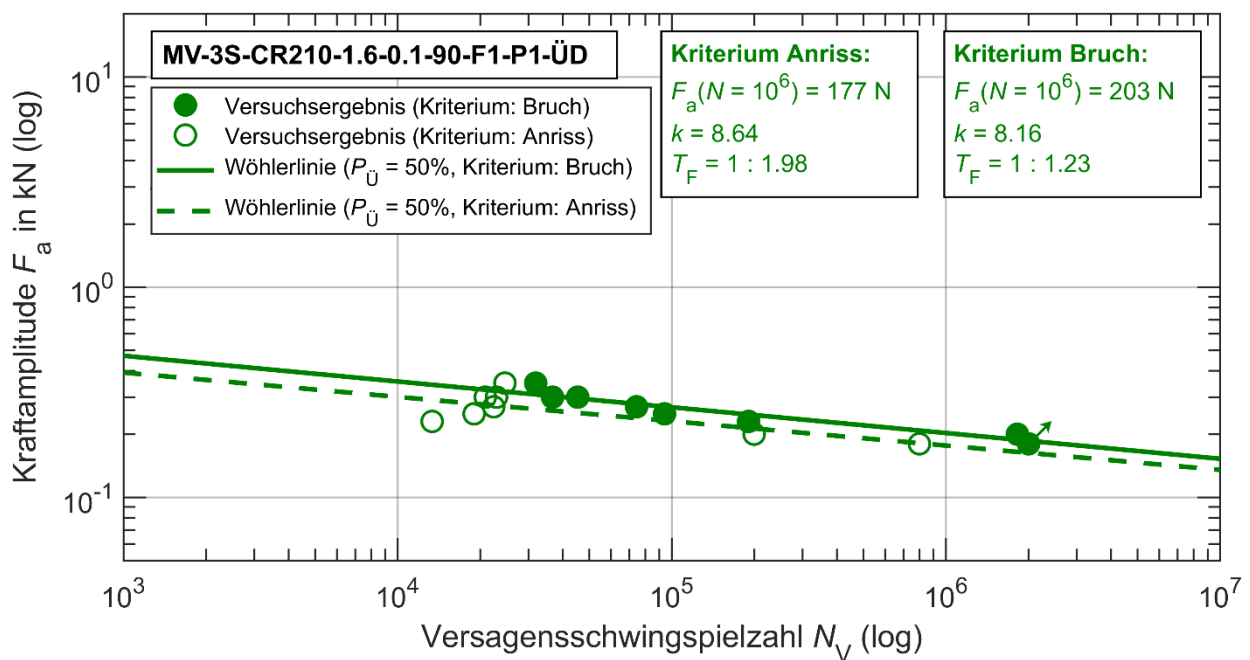
10. Versuchsreihe MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P1-ÜD

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P1-ÜD (Überlast Druck)
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	0° (P1)
Überlast	Druck (ja)

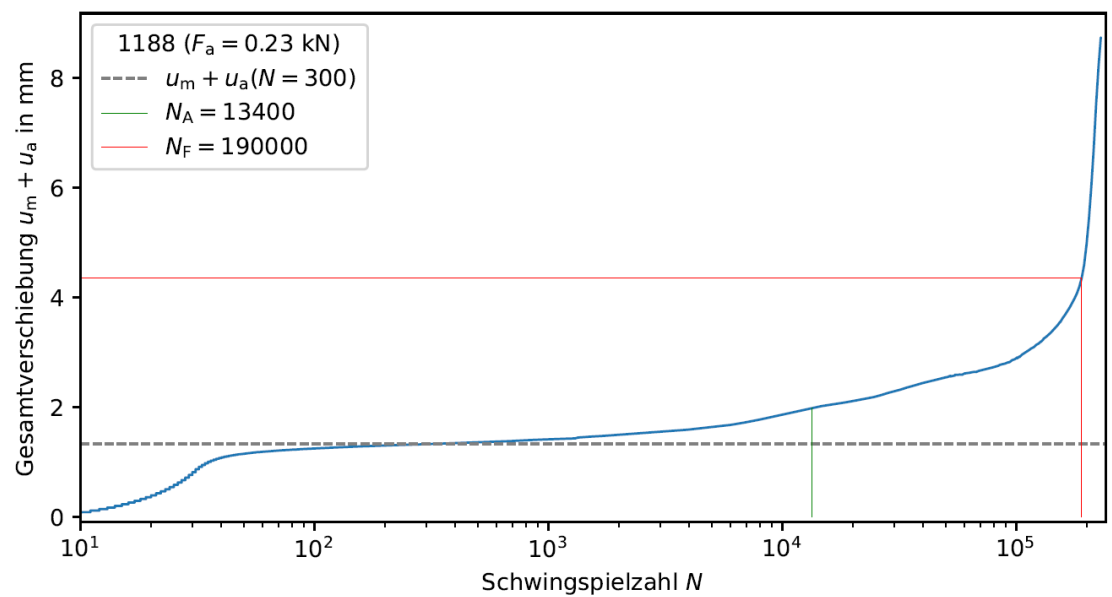
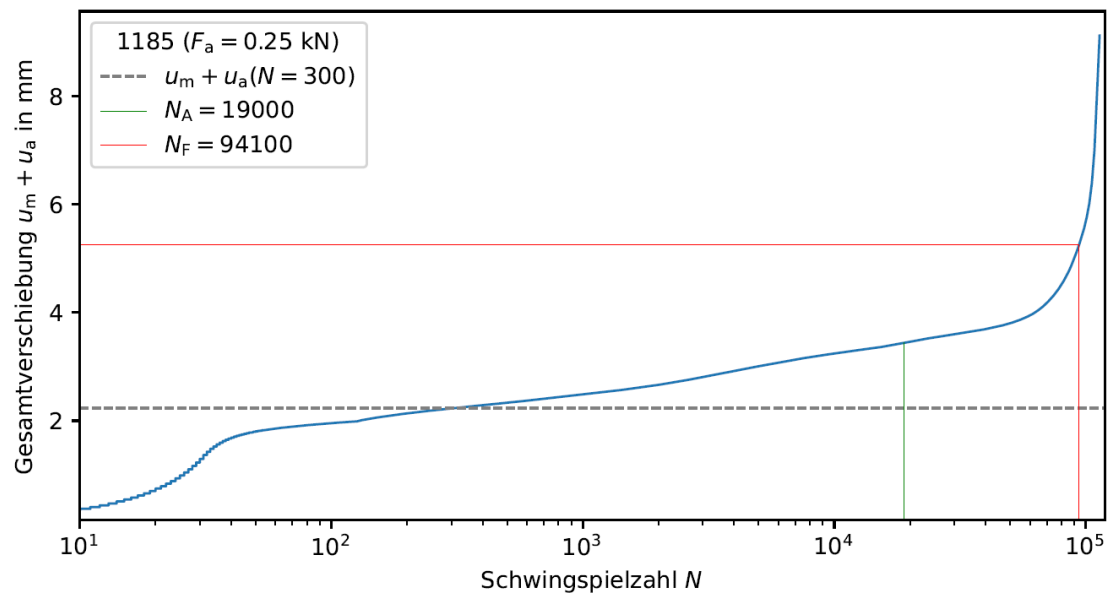
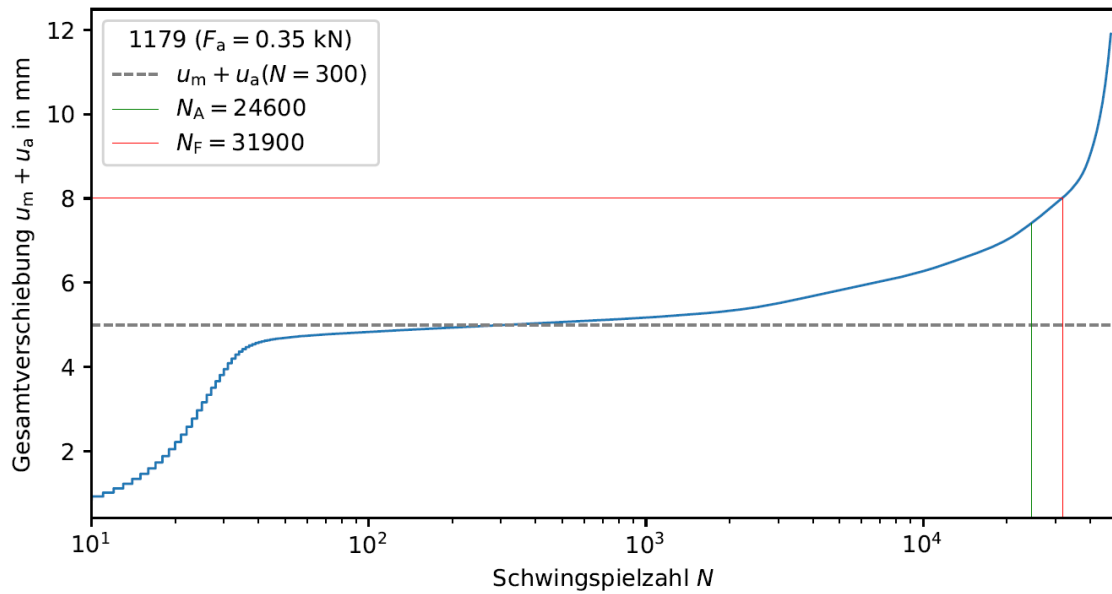


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1179	27	14	3	350	31889	24621	$N_f: u_{\max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1182	27	14	3	300	36721	20884	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1183	27	14	3	300	45376	22944	
4	1189	27	14	3	270	74352	22410	
5	1185	27	14	3	250	94063	19009	
6	1188	27	14	3	230	190454	13359	
7	1186	27	14	3	200	1820456	199625	
8	1184	27	14	3	180	2000000	799369	Durchläufer

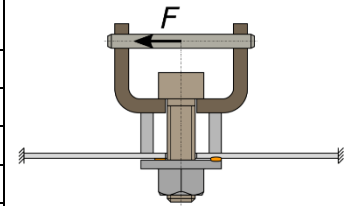


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



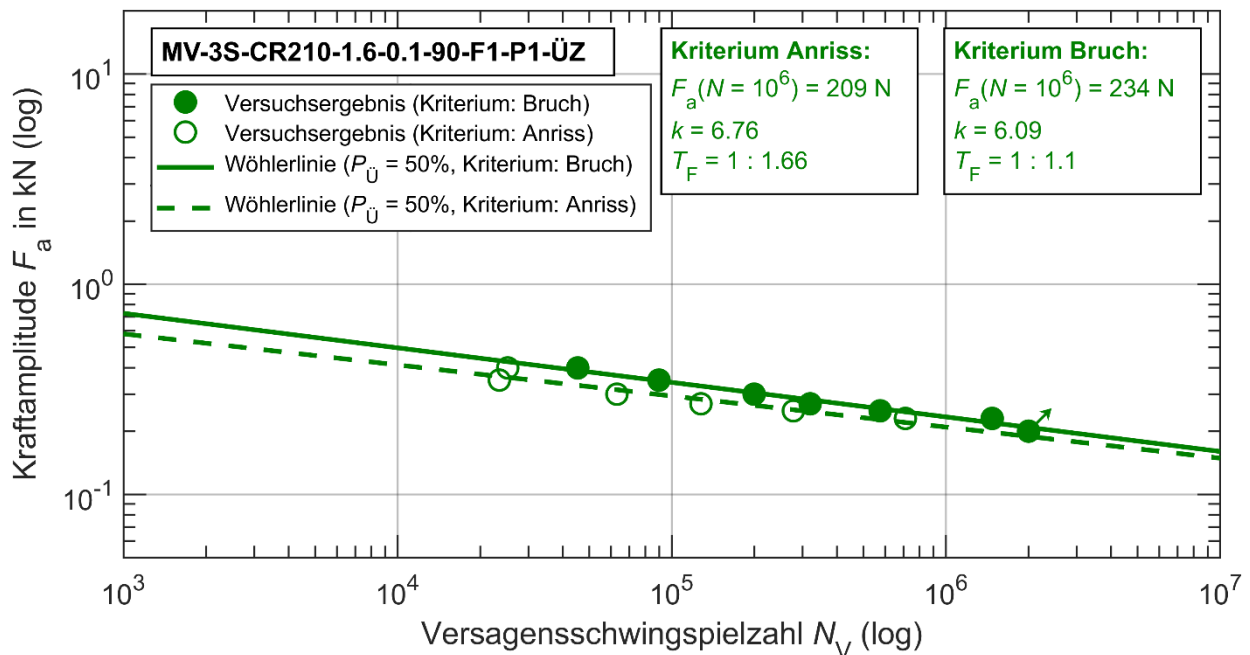
11. Versuchsreihe MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P1-ÜZ

Versuchsreihenbezeichnung	MV-3S-CR210-1.6-0.1-90-F1-P1-ÜZ (Überlast Zug)
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	0° (P1)
Überlast	Zug (ja)

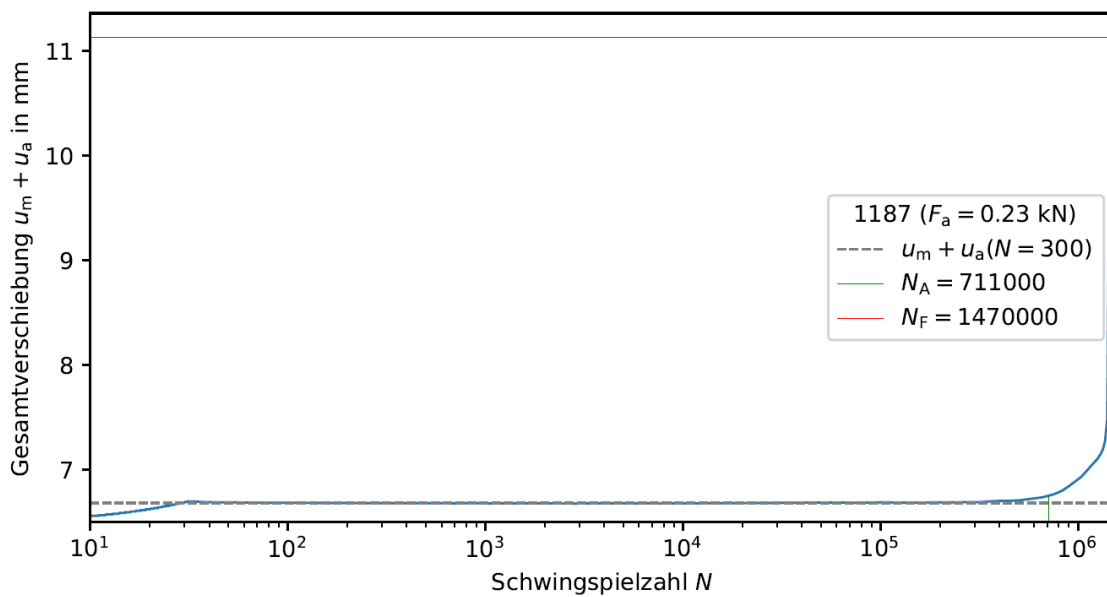
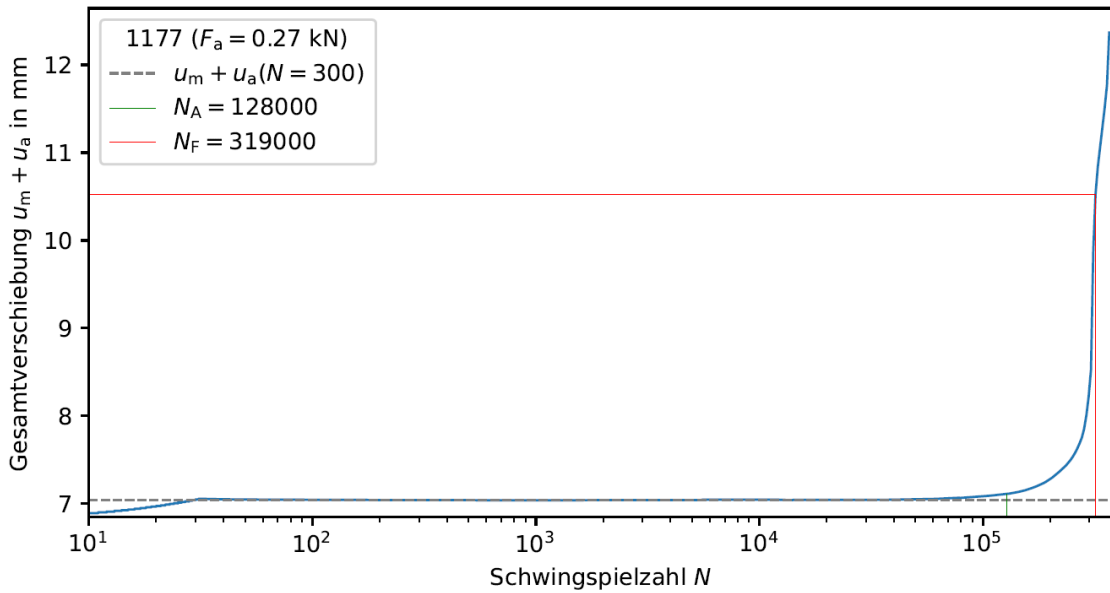
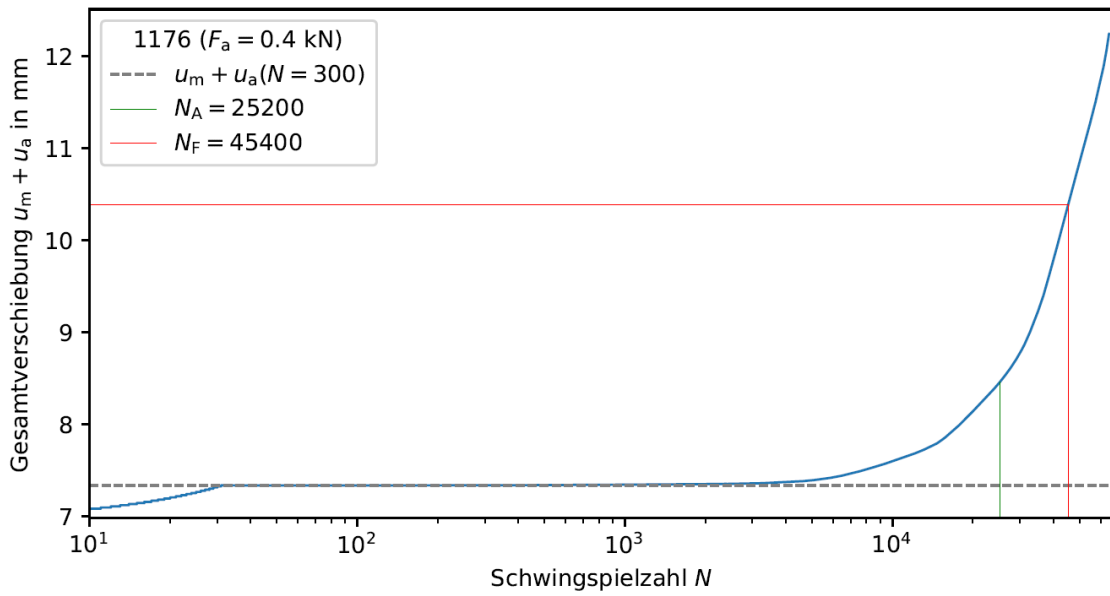


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1176	27	14	3	400	45376	25207	$N_f: u_{\max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1180	27	14	3	350	89741	23490	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1178	27	14	3	300	199625	63067	
4	1177	27	14	3	270	319495	127697	
5	1175	27	14	3	250	575140	277453	
6	1187	27	14	3	230	1473225	710698	
7	1190	27	14	3	200	2000000	2000000	Durchläufer

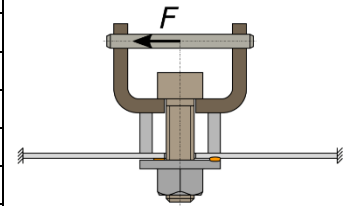


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



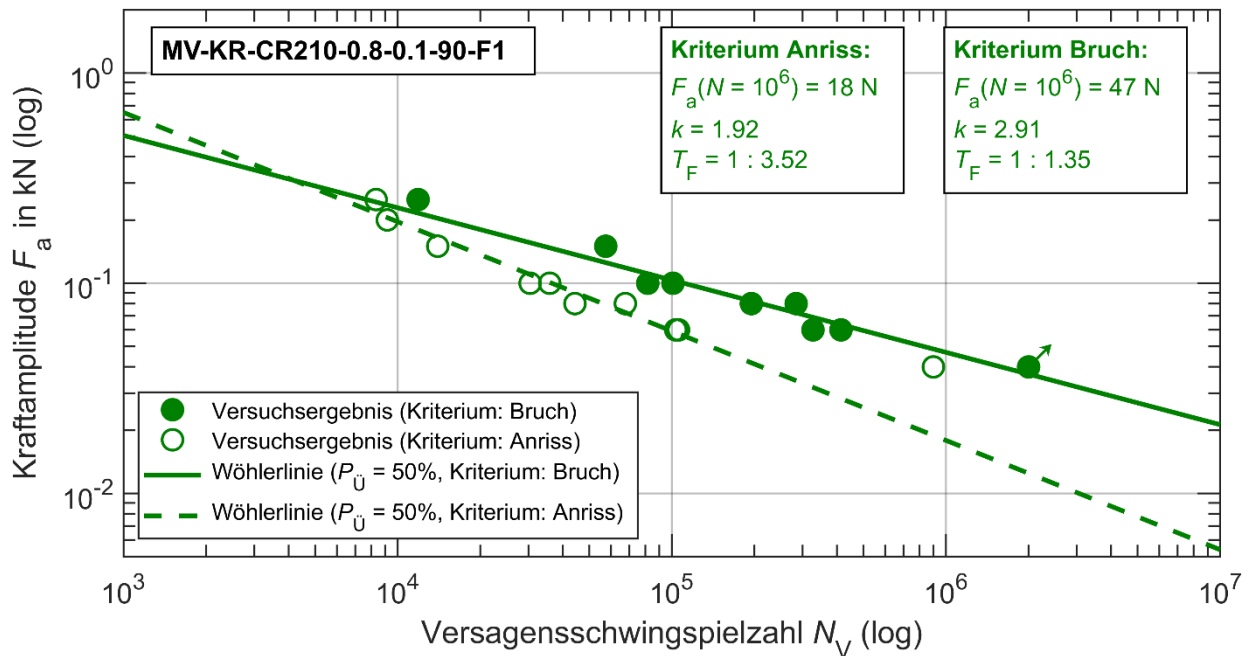
12. Versuchsreihe MV-KR-CR210-0.8-0.1-90-F1

Versuchsreihenbezeichnung	MV-KR-CR210-0.8-0.1-90-F1
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	0,8
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	- (nicht zutreffend)
Überlast	- (nein)

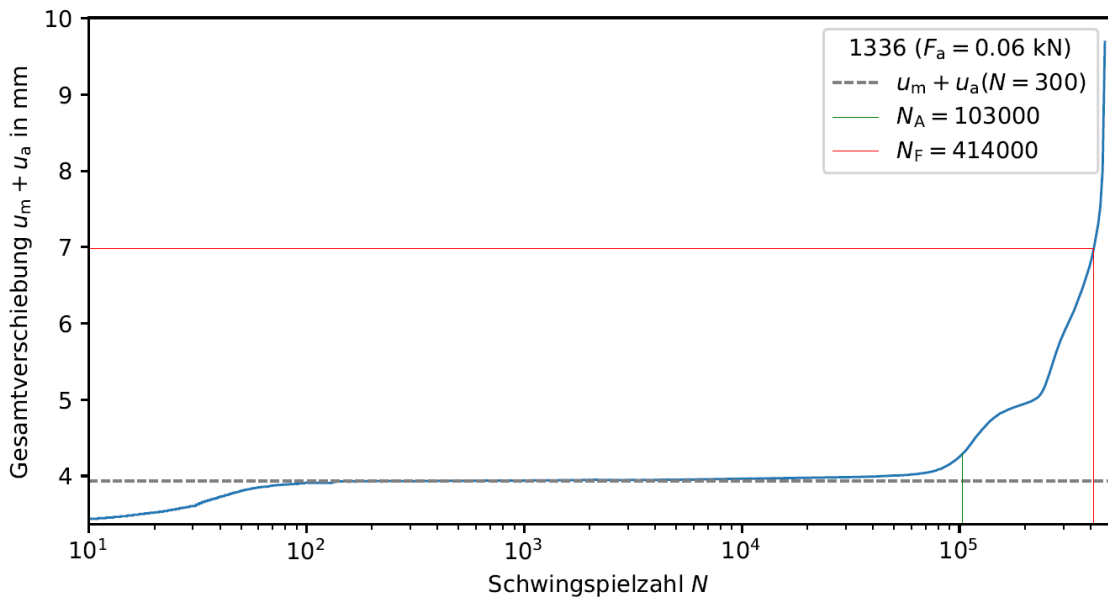
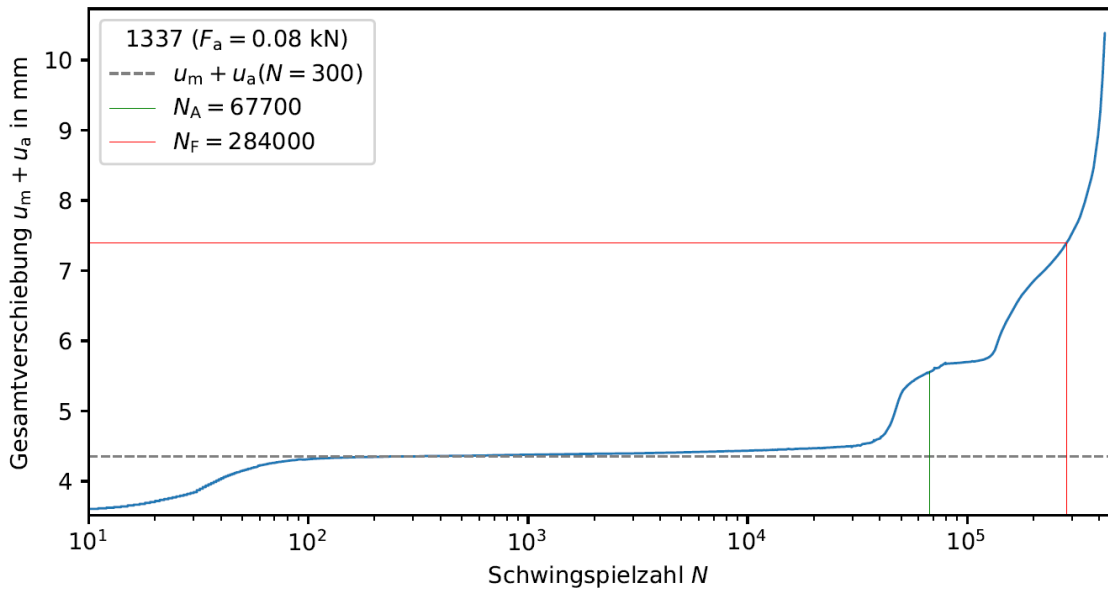
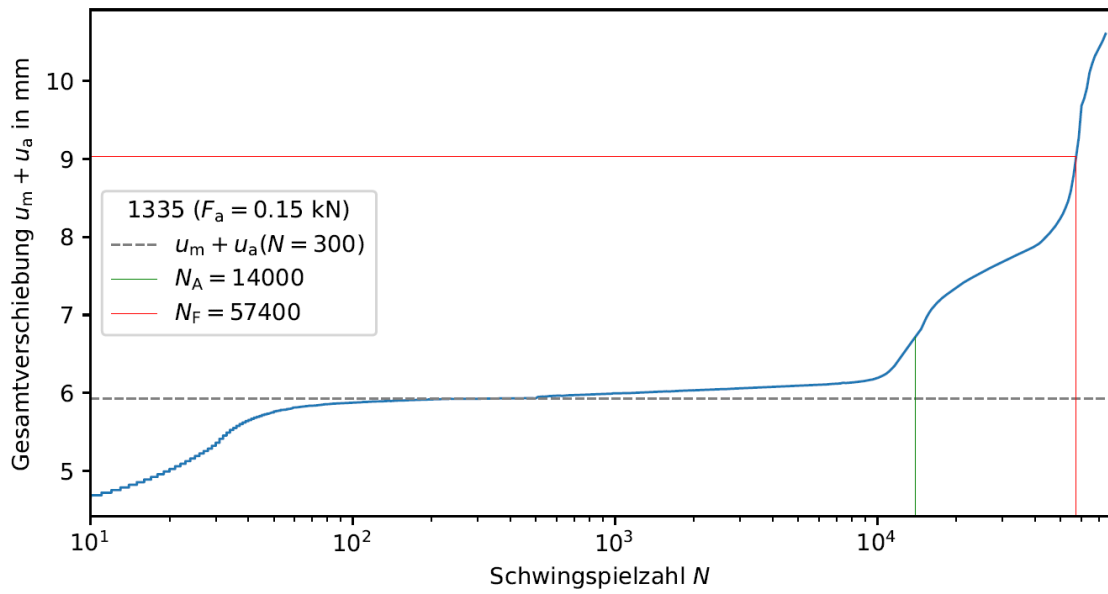


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1327	27	14	3	250	11877	8346	$N_f: u_{max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1333	27	14	3	200	-	9170	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1335	27	14	3	150	57406	14002	
4	1332	27	14	3	100	100938	30424	
5	1339	27	14	3	100	81685	35868	
6	1337	27	14	3	80	284055	67677	
7	1334	27	14	3	80	194986	44322	
8	1329	27	14	3	60	327097	105799	
9	1336	27	14	3	60	413809	103340	
10	1338	27	14	3	40	2000000	899102	Durchläufer

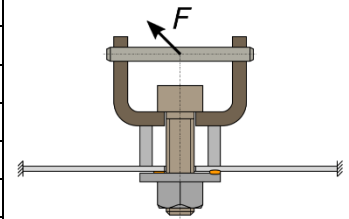


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



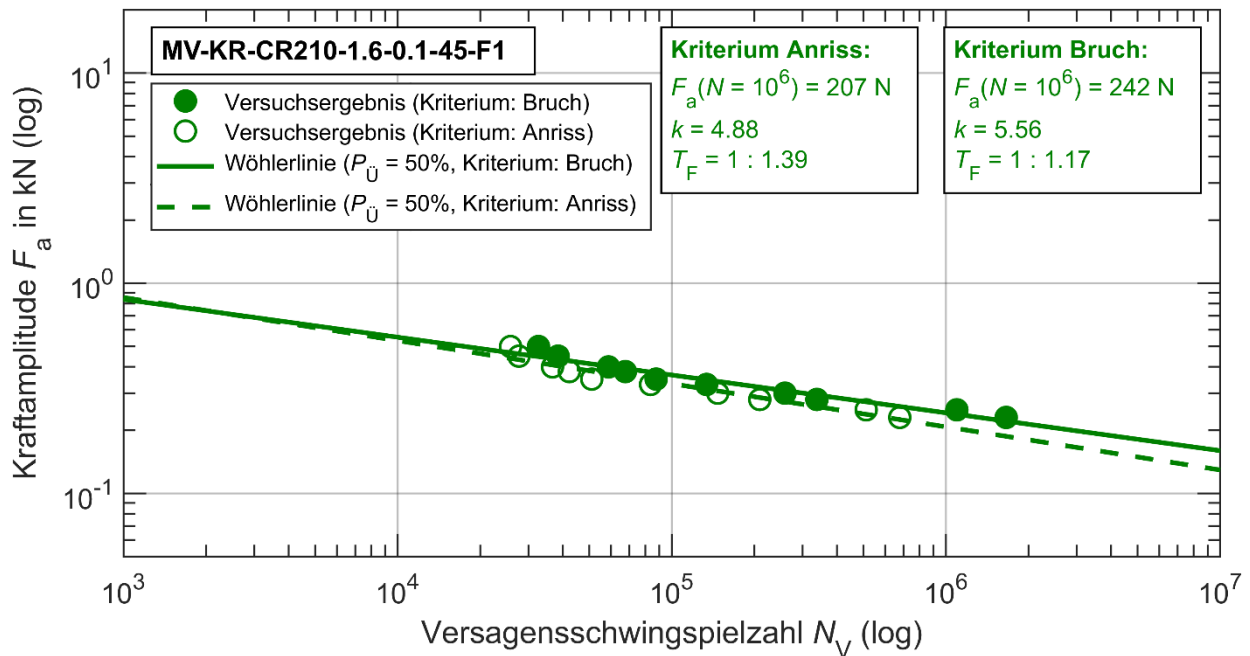
13. Versuchsreihe MV-KR-CR210-1.6-0.1-45-F1

Versuchsreihenbezeichnung	MV-KR-CR210-1.6-0.1-45-F1
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1.6
Lastrichtung als Winkel α [°]	45
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	- (nicht zutreffend)
Überlast	- (nein)

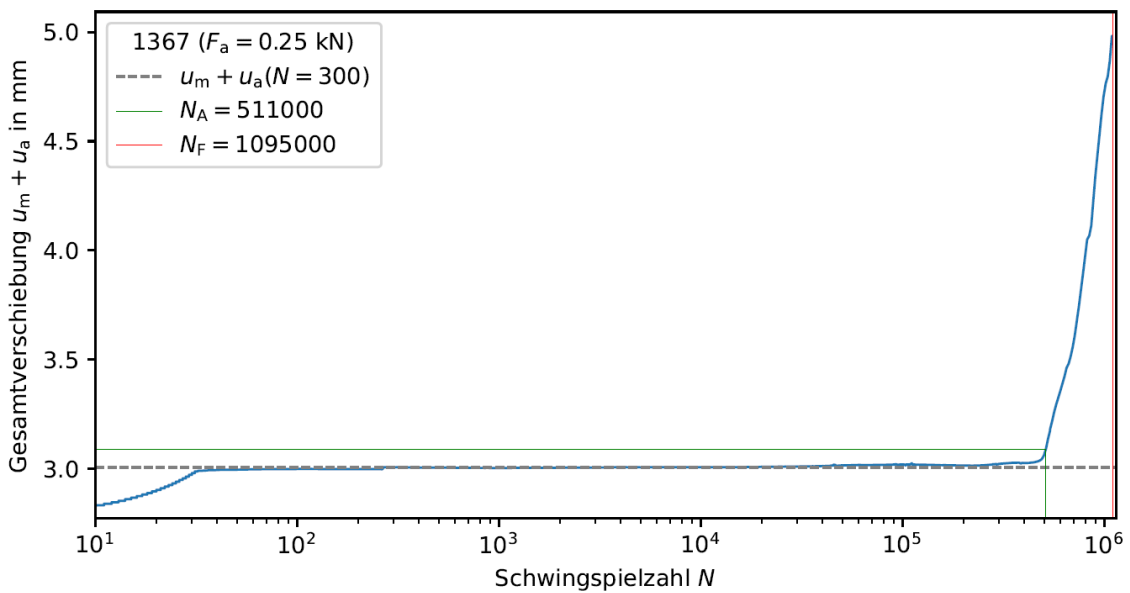
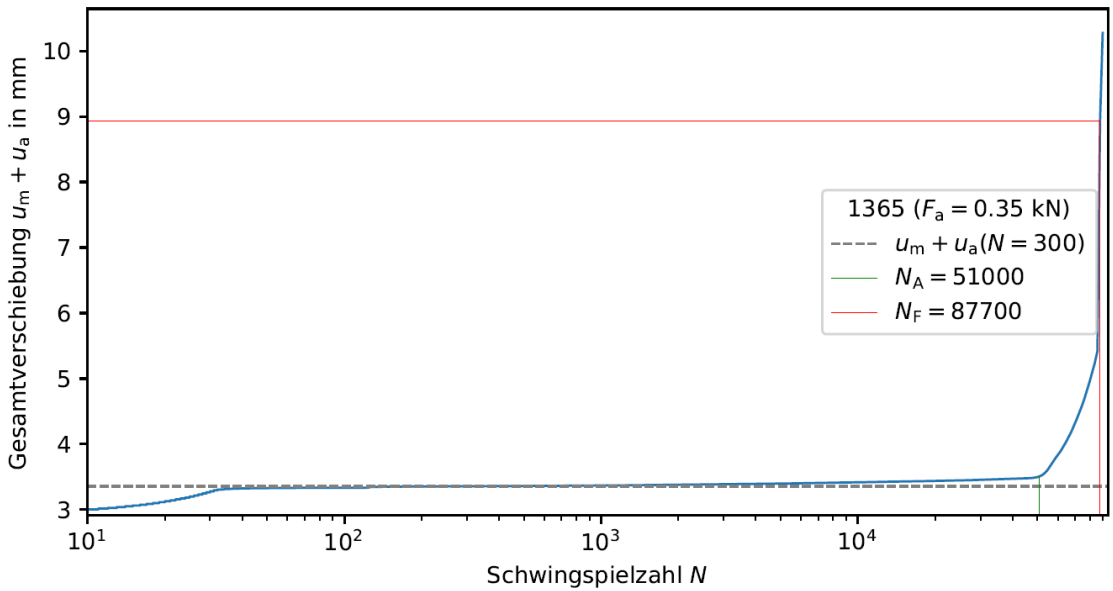
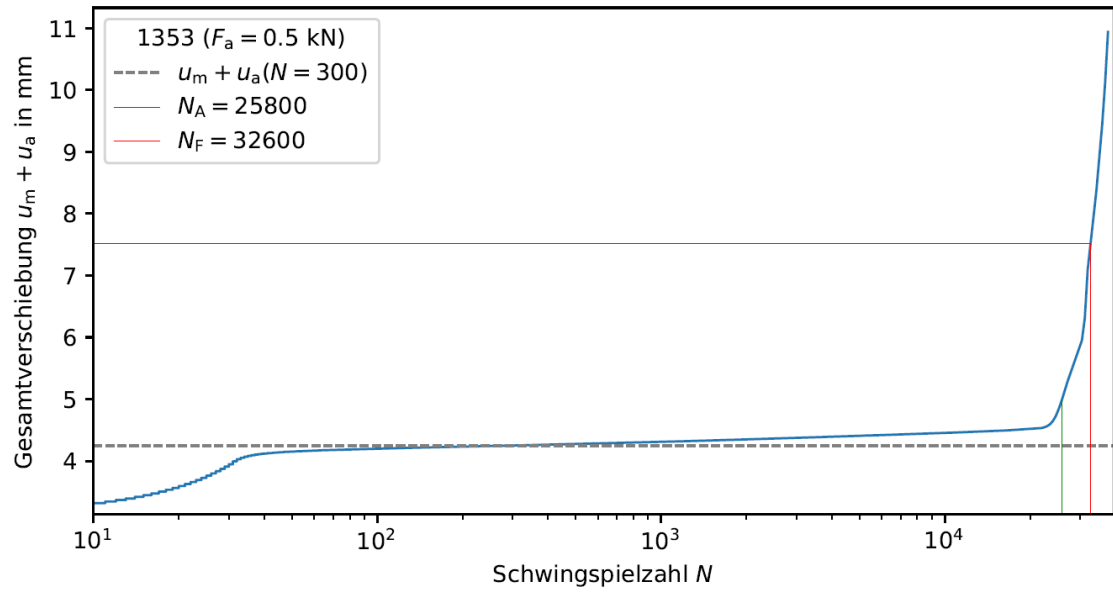


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1353	27	14	3	500	32648	25806	$N_f: u_{max}(n = 300) \pm 3$ mm
2	1335	27	14	3	450	38489	27693	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1349	27	14	3	400	58772	36721	
4	1356	27	14	3	380	67677	42286	
5	1365	27	14	3	350	87656	51038	
6	1358	27	14	3	330	133846	83629	
7	1347	27	14	3	300	258542	147046	
8	1345	27	14	3	280	338022	209238	
9	1367	27	14	3	250	1094901	511343	
10	1357	27	14	3	230	1657032	678048	

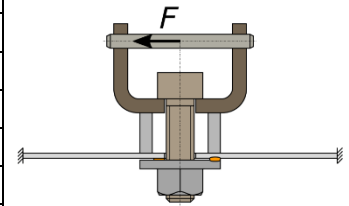


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



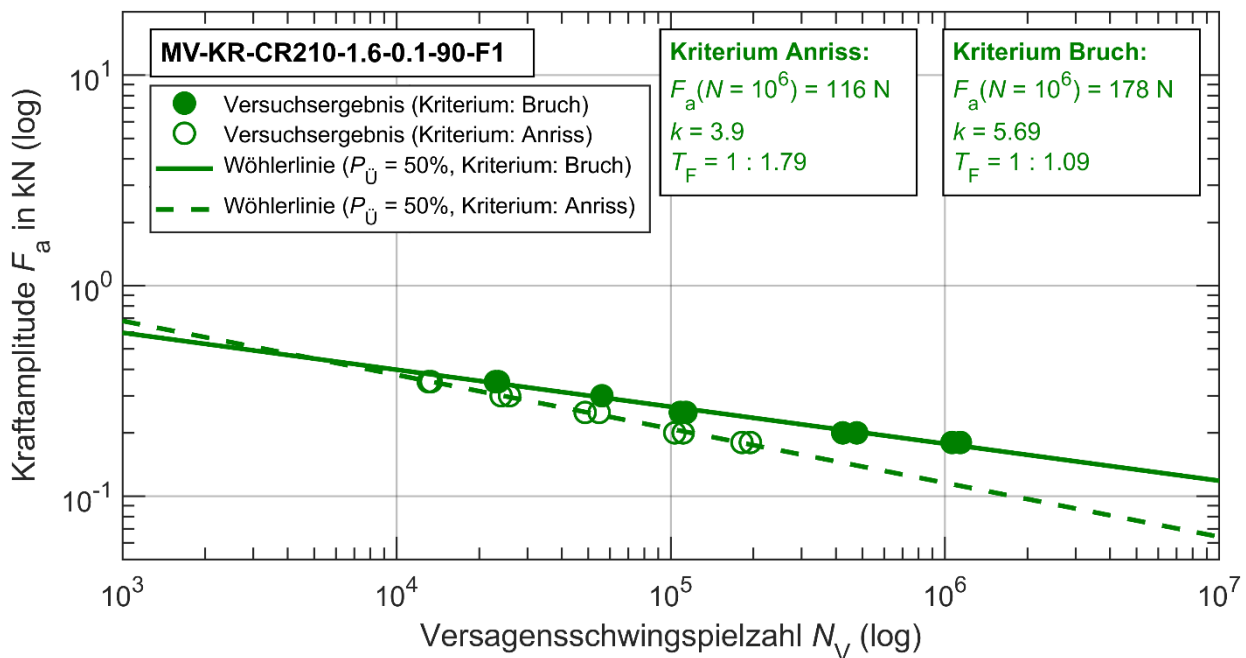
14. Versuchsreihe MV-KR-CR210-1.6-0.1-90-F1

Versuchsreihenbezeichnung	MV-KR-CR210-1.6-0.1-45-F1
Probentyp	Mutterverbundprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1.6
Lastrichtung als Winkel α [°]	90
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	14 (F1)
Position ggü. Lastachse	- (nicht zutreffend)
Überlast	- (nein)

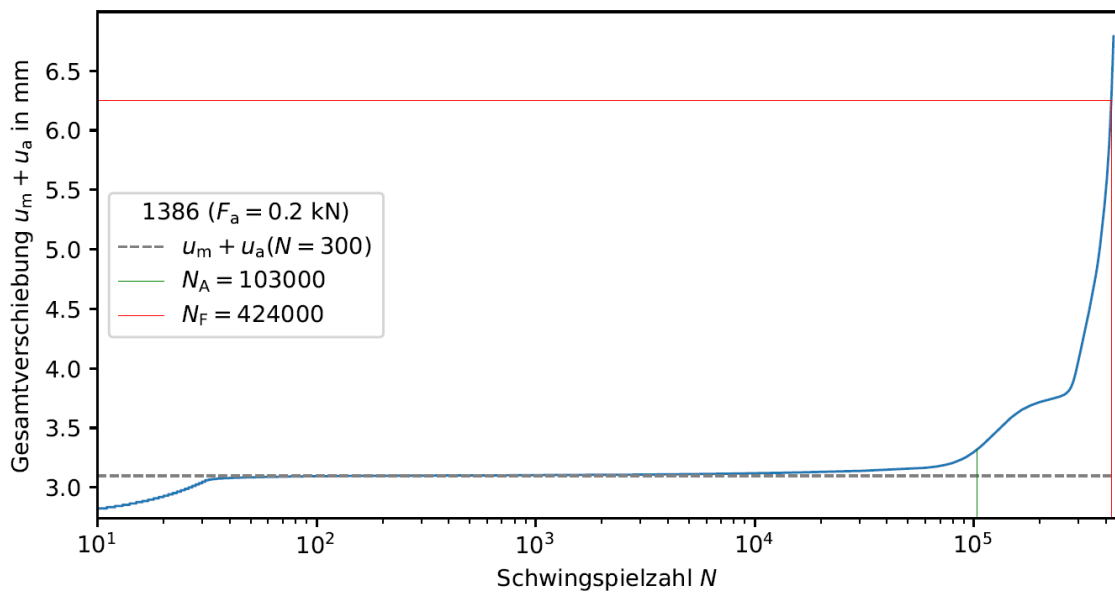
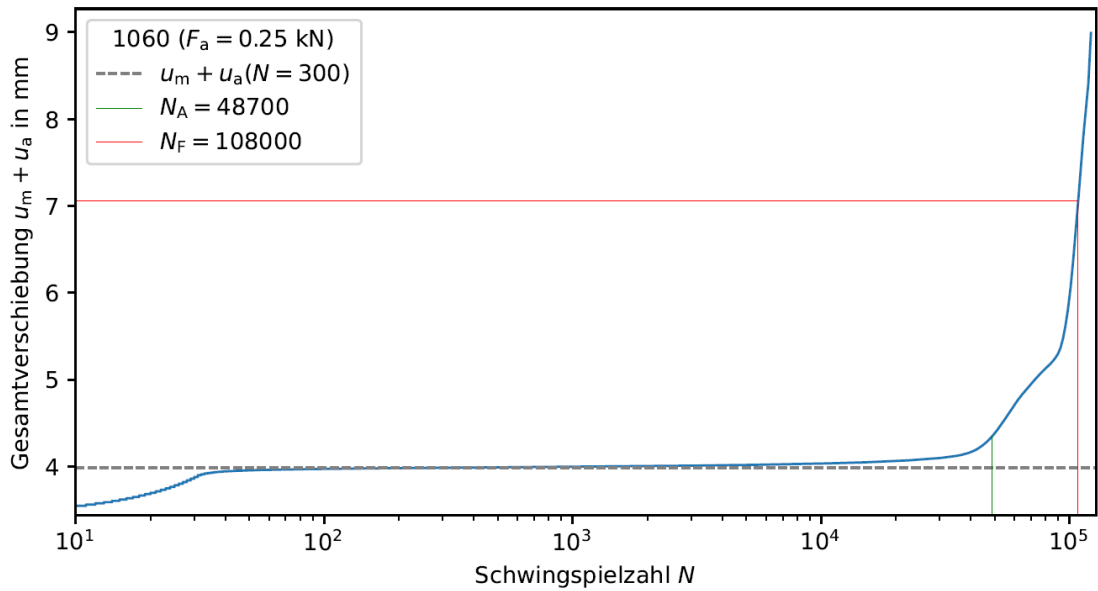
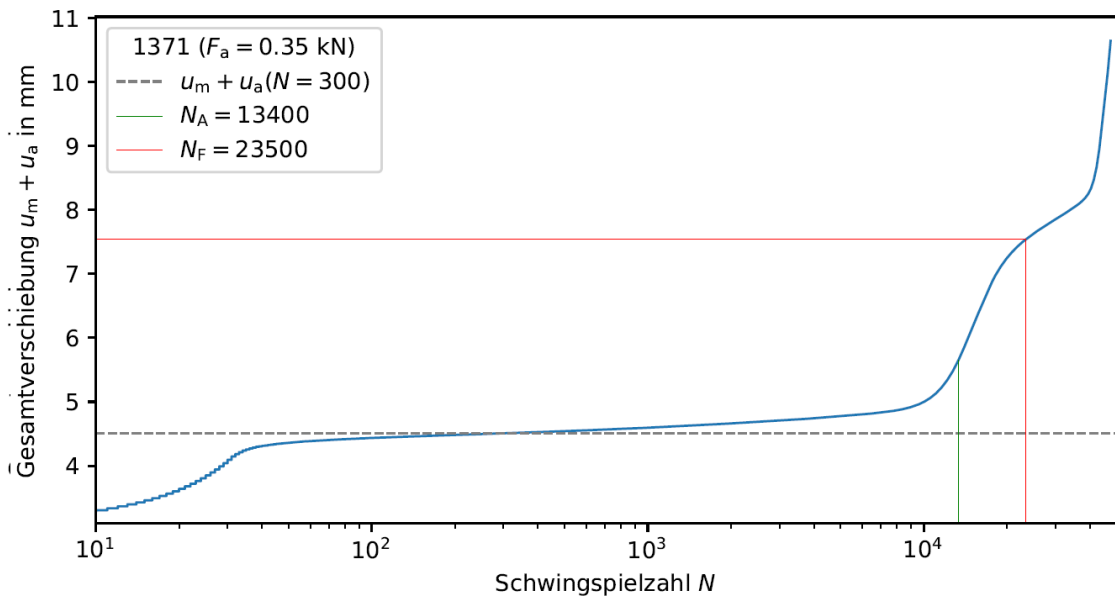


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1371	27	14	3	350	23490	13359	$N_f: u_{\max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1373	27	14	3	350	22944	13048	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1372	27	14	3	300	56072	24048	
4	1380	27	14	3	300	56072	25806	
5	1060	27	14	3	250	108316	48693	
6	1370	27	14	3	250	113532	54768	
7	1379	27	14	3	200	476513	110893	
8	1386	27	14	3	200	423655	103340	
9	1374	27	14	3	180	1059975	194986	
10	1369	27	14	3	180	1137451	181705	

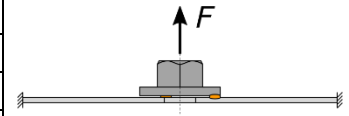


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



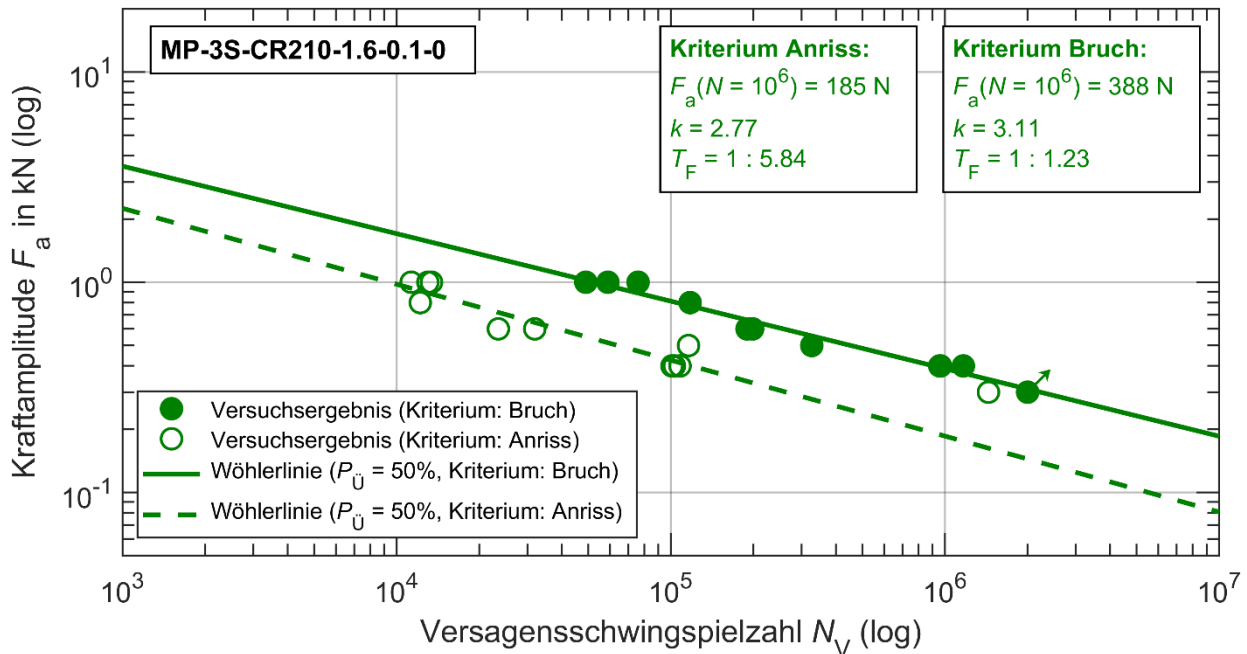
15. Versuchsreihe MP-3S-CR210-1.6-0.1-0

Versuchsreihenbezeichnung	MP-3S-CR210-1.6-0.1-0
Probentyp	Mutterprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	0
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	- (nicht zutreffend)
Position ggü. Lastachse	- (nicht zutreffend)
Überlast	- (nein)

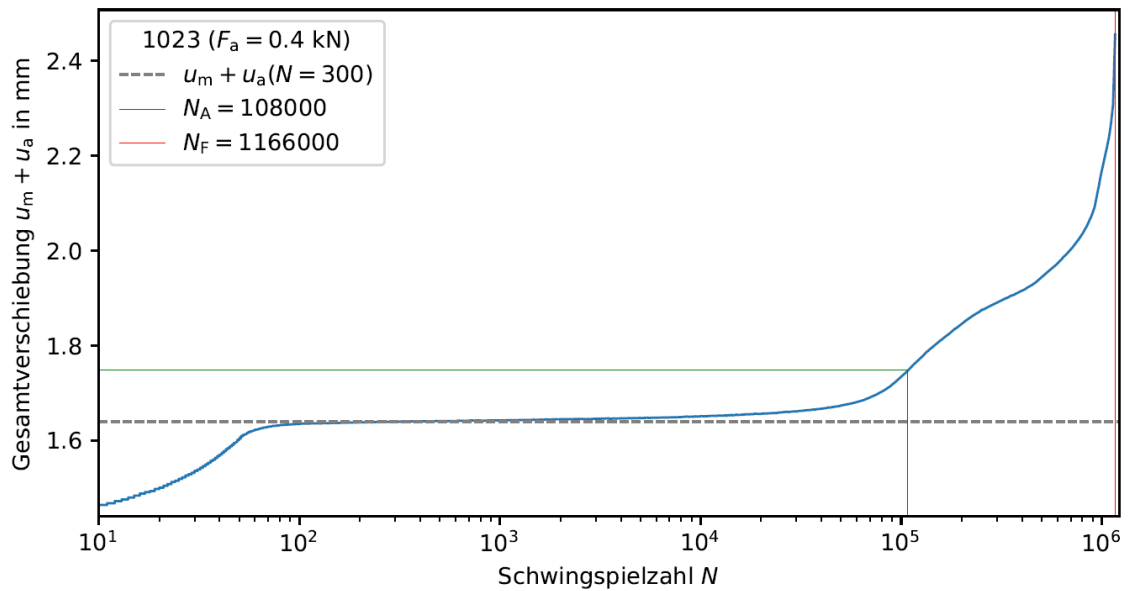
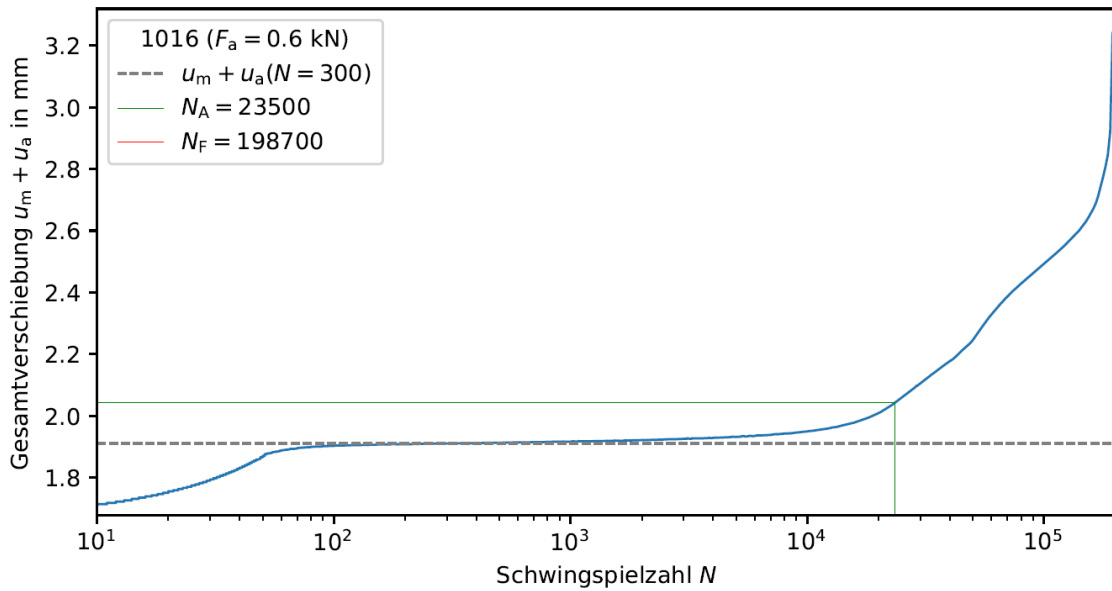
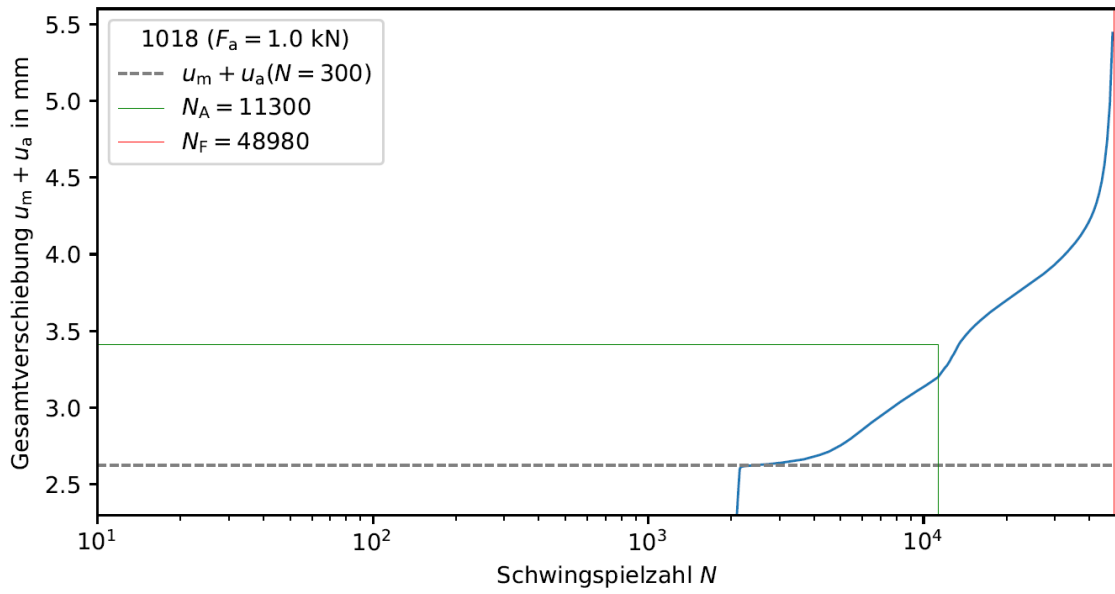


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1019	-	-	3	1000	58940	13000	$N_f: u_{\max}(n = 300) \pm 3$ mm
2	1018	-	-	3	1000	48979	11300	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1017	-	-	3	1000	75942	13400	
4	1013	-	-	3	800	117560	12200	
5	1020	-	-	3	600	189637	31900	
6	1016	-	-	3	600	198715	23500	
7	1021	-	-	3	500	326497	116000	
8	1023	-	-	3	400	1166195	108000	
9	1014	-	-	3	400	962156	103000	
10	1010	-	-	3	400	956750	101000	
11	1011	-	-	3	300	2000000	1440000	Durchläufer

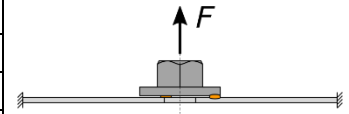


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



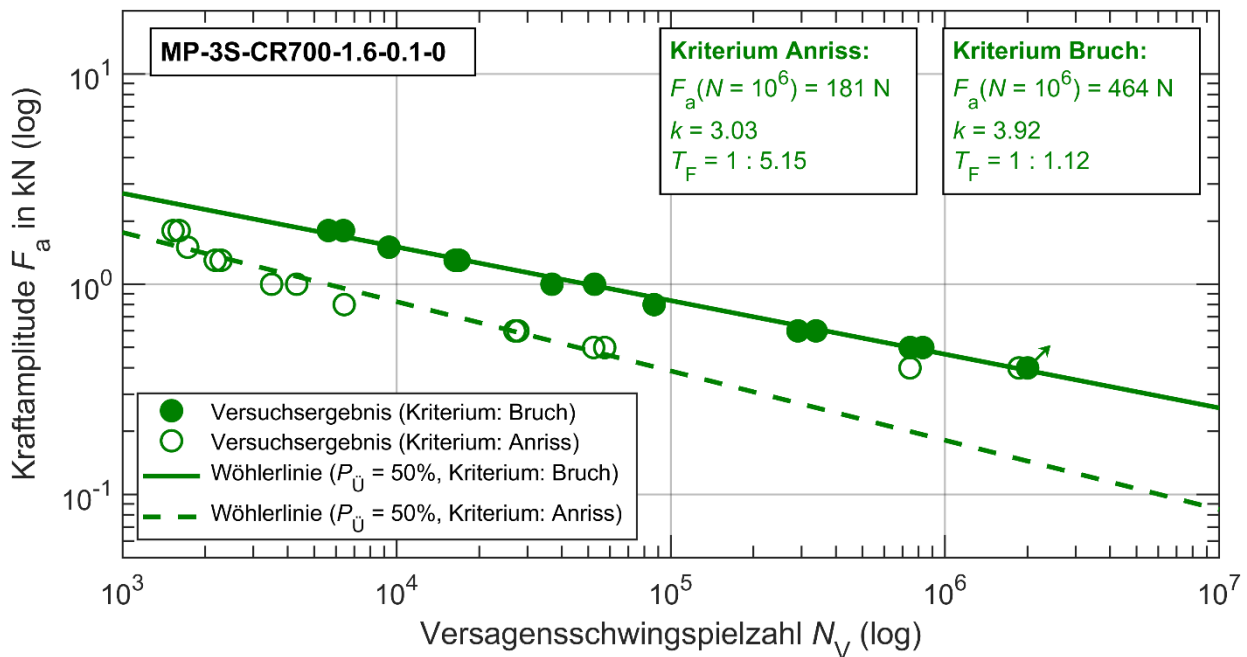
16. Versuchsreihe MP-3S-CR700-1.6-0.1-0

Versuchsreihenbezeichnung	MP-3S-CR210-1.6-0.1-0
Probentyp	Mutterprobe
Blechwerkstoff	CR700Y980T-DP-EG50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	0
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	- (nicht zutreffend)
Position ggü. Lastachse	- (nicht zutreffend)
Überlast	- (nein)

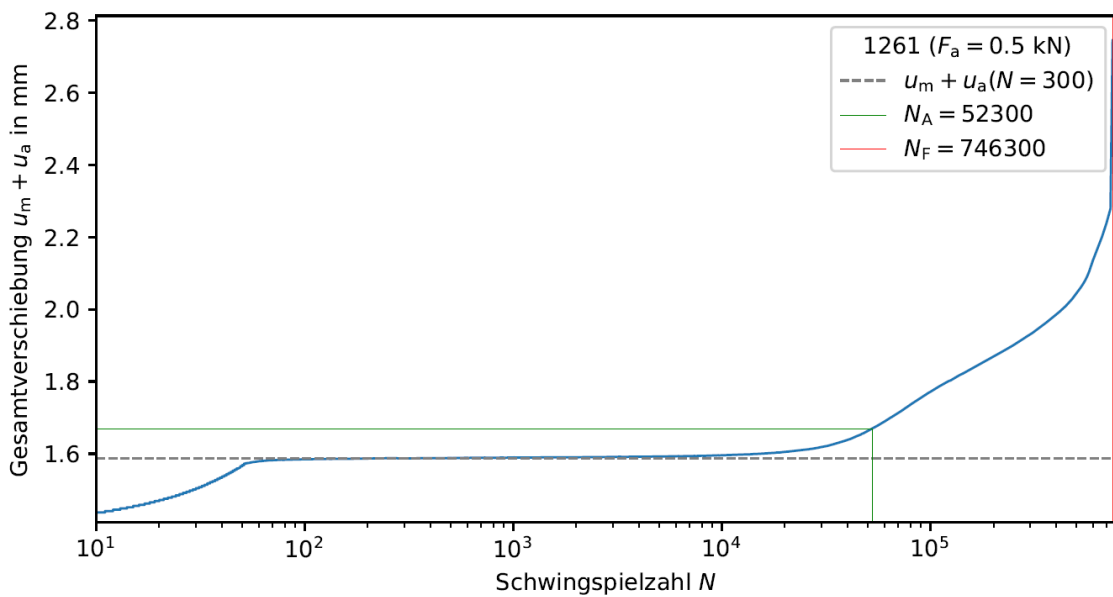
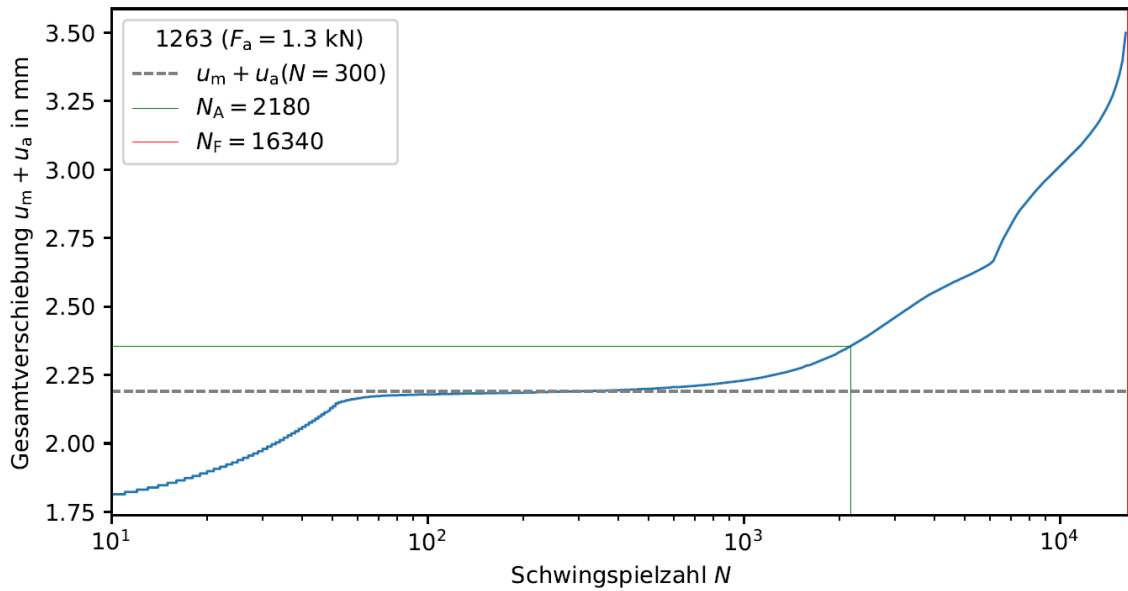
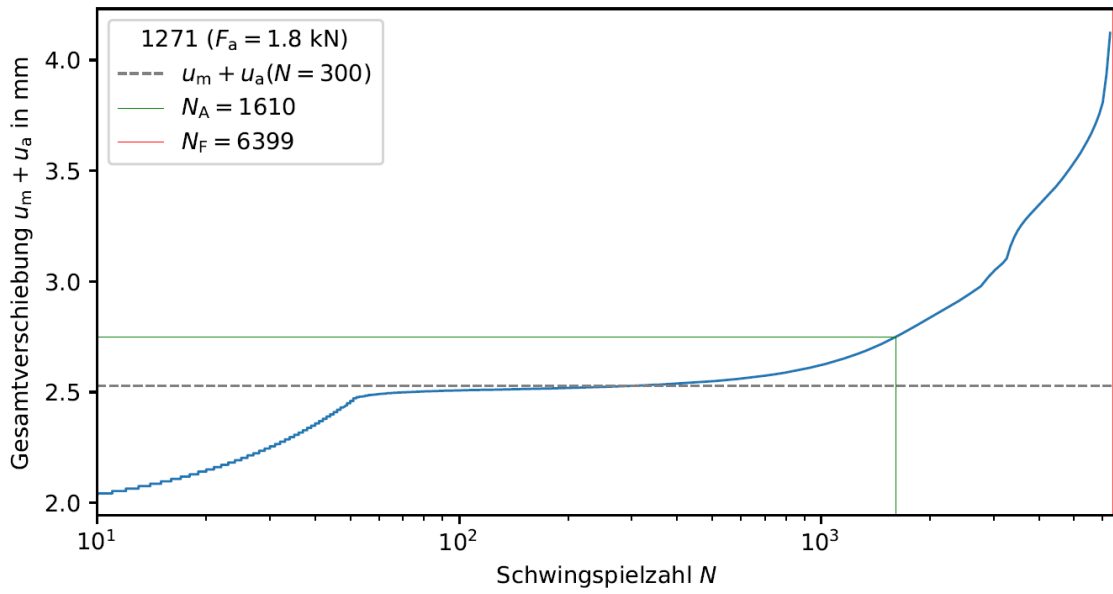


Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1271	-	-	3	1800	6399	1610	$N_f: u_{max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1280	-	-	3	1800	5640	1530	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1274	-	-	3	1500	9381	1730	
4	1263	-	-	3	1300	16340	2180	
5	1262	-	-	3	1300	16890	2290	
6	1272	-	-	3	1000	52677	4320	
7	1278	-	-	3	1000	36855	3500	
8	1080	-	-	3	800	86930	6440	
9	1275	-	-	3	600	290745	27700	
10	1264	-	-	3	600	338465	27000	
11	1265	-	-	3	500	829400	57400	
12	1261	-	-	3	500	746309	52300	
13	1276	-	-	3	400	2000000	1860000	Durchläufer
14	1269	-	-	3	400	2000000	745000	Durchläufer

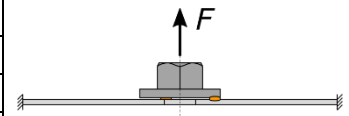


Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)



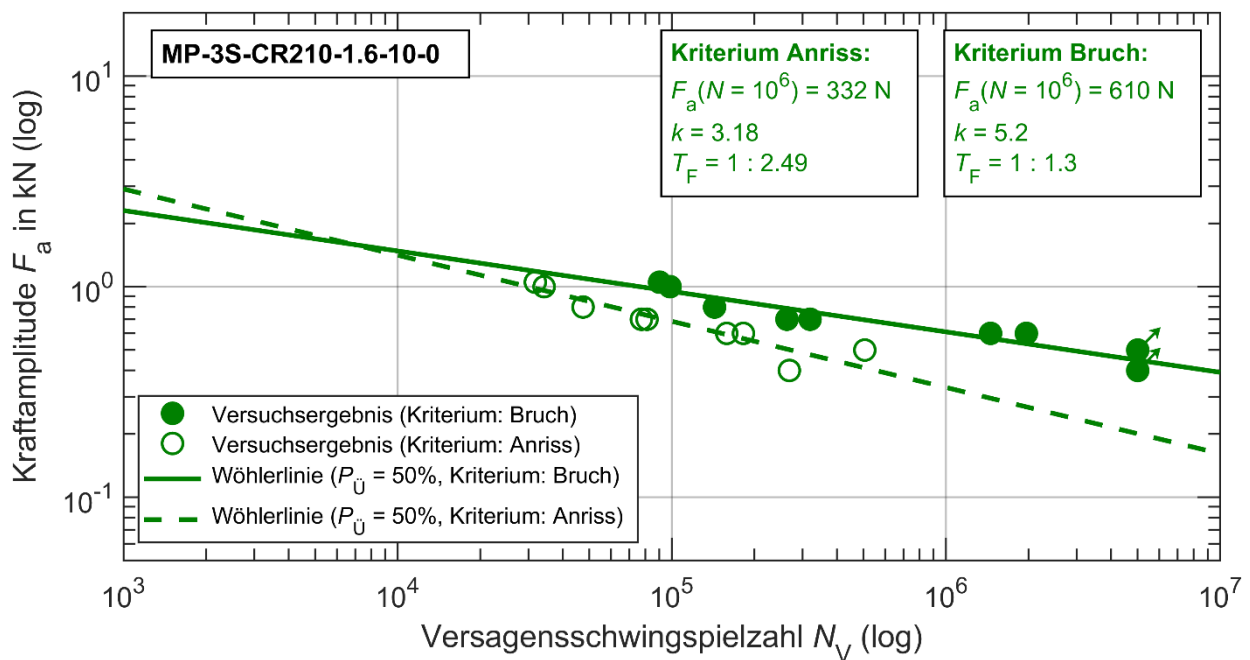
17. Versuchsreihe MP-3S-CR210-1.6-10-0

Versuchsreihenbezeichnung	MP-3S-CR210-1.6-10-0
Probentyp	Mutterprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	0
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	10
Vorspannkraft F_V [kN]	- (nicht zutreffend)
Position ggü. Lastachse	- (nicht zutreffend)
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

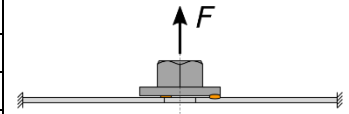
Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1	1242	-	-	3	1050	90223	31770	$N_f: u_{\max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2	1009	-	-	3	1000	98531	34210	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3	1250	-	-	3	800	143136	47457	
4	1260	-	-	3	700	319370	77439	
5	1259	-	-	3	700	262858	81195	
6	1036	-	-	3	600	1453307	158577	
7	1027	-	-	3	600	1963432	182380	
8	1033	-	-	3	500	5000000	505474	Durchläufer
9	1031	-	-	3	400	5000000	268260	Durchläufer



Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)

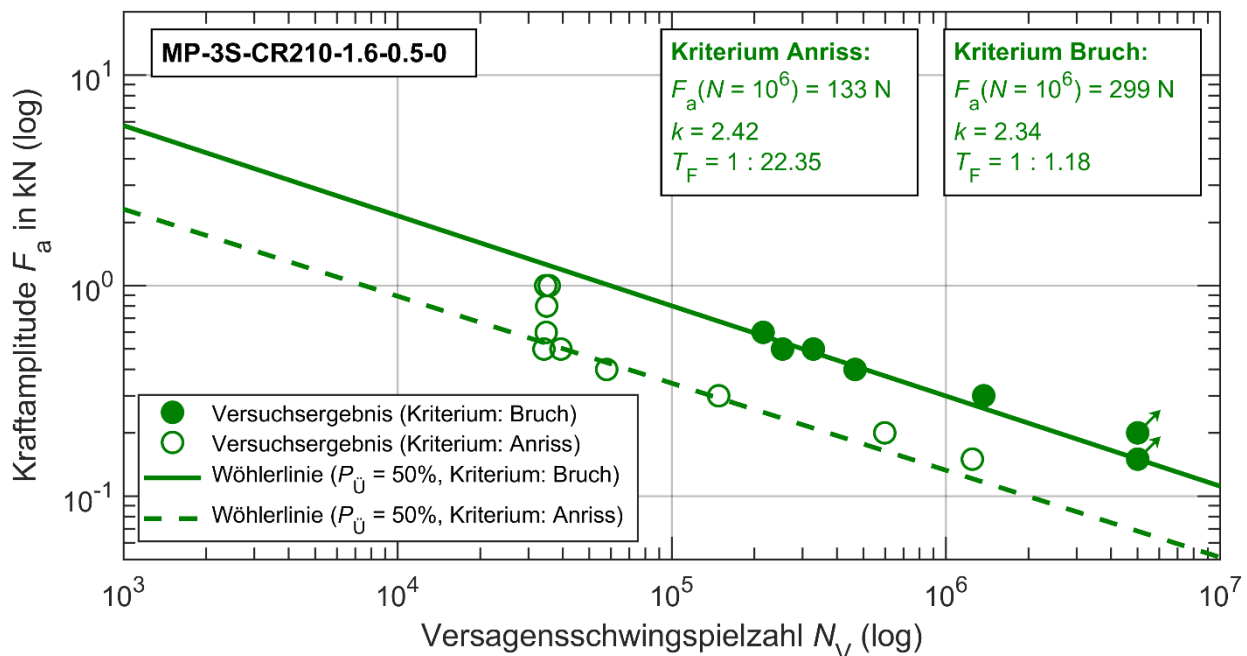
18. Versuchsreihe MP-3S-CR210-1.6-0.5-0

Versuchsreihenbezeichnung	MP-3S-CR210-1.6-0.5-0
Probentyp	Mutterprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	0
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,5
Vorspannkraft F_V [kN]	- (nicht zutreffend)
Position ggü. Lastachse	- (nicht zutreffend)
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

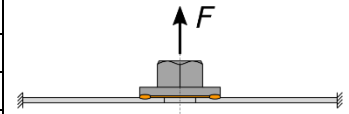
Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1		-	-	3	1000	-	34670	$N_f: u_{\max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2		-	-	3	1000	-	35716	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3		-	-	3	800	-	34962	
4		-	-	3	600	215224	34822	
5		-	-	3	500	253387	34166	
6		-	-	3	500	328156	39395	
7		-	-	3	400	465939	57875	
8		-	-	3	300	1372210	148179	
9		-	-	3	200	5000000	597717	Durchläufer
10		-	-	3	150	5000000	1247322	Durchläufer



Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)

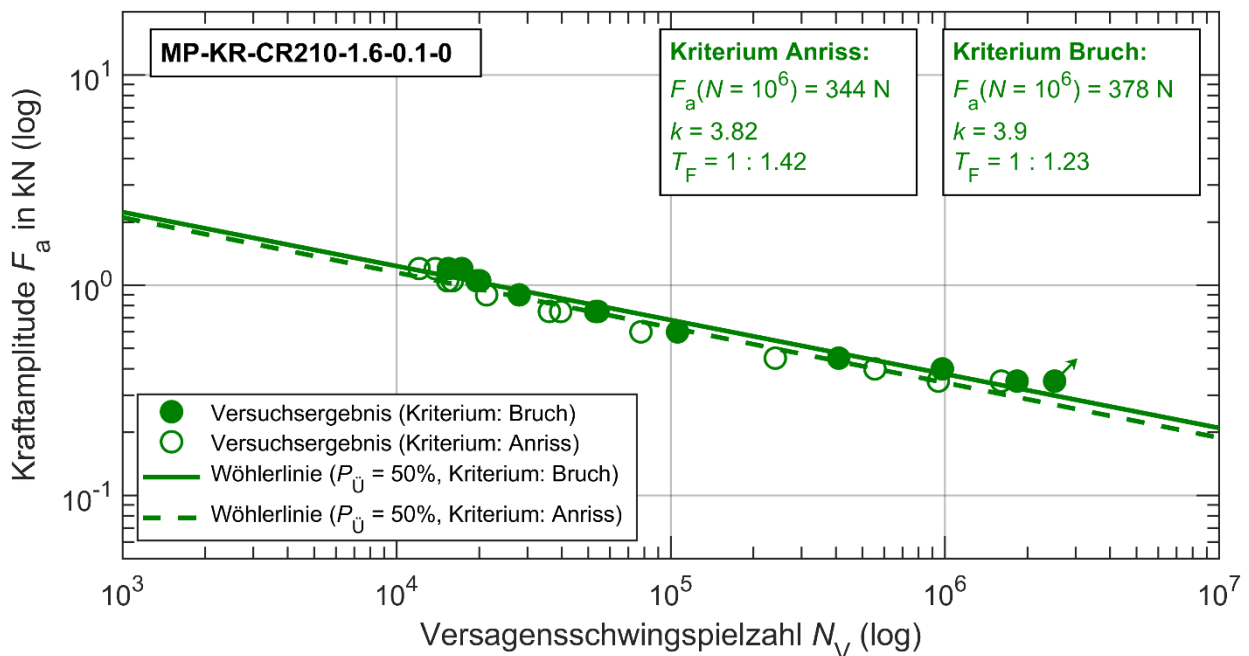
19. Versuchsreihe MP-KR-CR210-1.6-0.1-0

Versuchsreihenbezeichnung	MP-KR-CR210-1.6-0.1-0
Probentyp	Mutterprobe
Blechwerkstoff	CR210BH-GI50/50-U
Blechdicke t [mm]	1,6
Lastrichtung als Winkel α [°]	0
Belastungsart	konstante Lastamplituden
Lastverhältnis R_F [-]	0,1
Vorspannkraft F_V [kN]	- (nicht zutreffend)
Position ggü. Lastachse	- (nicht zutreffend)
Überlast	- (nein)



Versuchsergebnisse zur Auswertung des Versagenskriteriums „Versagen der Mutterschweißung“

Nr.	Probenbezeichnung	M_A [Nm]	F_V [kN]	f [Hz]	F_a [N]	N_f [-]	N_A [-]	Bemerkung
1		-	-	3	1200	17288	13831	$N_f: u_{max}(n = 300) \pm 3 \text{ mm}$
2		-	-	3	1200	15446	12083	$N_A: u_a(n = 300) \pm 8\%$
3		-	-	3	1050	19611	15352	
4		-	-	3	1050	20093	15975	
5		-	-	3	900	27984	21291	
6		-	-	3	750	54213	39655	
7		-	-	3	750	53181	36058	
8		-	-	3	600	105785	77778	
9		-	-	3	450	409404	240440	
10		-	-	3	400	977511	555016	
11		-	-	3	350	1831350	944992	
12		-	-	3	350	2510183	1603586	Durchläufer



Gesamtverschiebungsverläufe (exemplarisch)

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2019)

Nr.	Titel
316	MULTIC-Tooling, 2019
317	EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
318	Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019
319	Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
320	Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
321	Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
322	Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
323	Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
324	Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
325	Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
326	Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
327	Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
328	Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
329	Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
330	Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
331	Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020
332	Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020
333	Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020
334	Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
335	Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020
336	Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020
337	Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020
338	Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckgusskomponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020

- 339 Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020
- 340 Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021
- 341 Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021
- 342 Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021
- 343 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021
- 344 Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021
- 345 Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021
- 346 Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021
- 347 Typgenehmigungsanforderungen an Level-3-Autobahnssysteme - Hintergrundbetrachtungen zu technischen Anforderungen für eine automatisierte Fahrfunktion, 2021
- 348 Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2021
- 349 Verstärkung dünner formgehärteter Bauteile mittels FVK-Verrippungen, 2021
- 350 HMI Anforderungen für den automatisierten Individualverkehr unter Berücksichtigung von Leistungsmöglichkeiten und -grenzen älterer Nutzer, 2021
- 351 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2021
- 352 Entwicklung einer gewichtsoptimierten Batteriegehäusestruktur für Volumenfahrzeuge, 2021
- 353 Charakterisierung und Modellierung des Deformations- und Versagensverhaltens von nicht-faserverstärkten Thermoplasten unter mehrachsiger Crashbelastung, 2021
- 354 Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens, 2021
- 355 Anforderungen an die Güte, Verfügbarkeit und Vorausschau einer Reibwertschätzung aus Funktionssicht, 2021
- 356 Entwicklung einer standardisierten Prüfanordnung zur Bewertung der Übernahmeleistung beim automatisierten Fahren, 2022
- 357 Vorstudie zu Verkehrsemissionen - Räumlich und zeitlich aufgelöste Daten durch Schwarmmessungen, 2022
- 358 Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laser-additiven Fertigung für den Automobilbau, 2022
- 359 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen mit Fokus auf den Ventilationswiderstand von Nfz-Rädern, 2022
- 360 Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der thermischen Behandlungen beim Lackieren im Prozess bei hochfesten Werkstoffen, 2022
- 361 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2022
- 362 Ermüdung kurzfaserverstärkter thermoplastischer Polymerwerkstoffe, 2022
- 363 Market research and definition of procedure to comparison of comfort measuring systems for a vehicle cabin, 2022

- 364 Methodische Ansätze zur Auswahl von Bordnetzstrukturen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen, 2022
- 365 Fahrwiderstand von Lenk- und Liftachsen in Kurven und auf gerader Strecke unter realen Umgebungsbedingungen, 2022
- 366 Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen, 2022
- 367 Experimentelle und numerische Untersuchung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen mit konstanten und variablen Amplituden und Entwicklung einer Bewertungsmethode, 2022
- 368 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process – Part 2, 2023
- 369 Level 2 hands-off – Recommendations and guidance, 2023
- 370 Funktionale Sicherheitsbewertung und Cybersecurity Analysen relevanter Use Cases für die Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2023
- 371 Study on the technical evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal data in the automotive sector, 2023
- 372 Legal evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal and non-personal data in the automotive sector, 2023
- 373 Quantifizierung der mechanischen Belastbarkeit von Infrarot-Schweißverbindungen in zyklisch belasteten Thermoplast-Bauteilen, 2023
- 374 Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung, 2023

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2023

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik