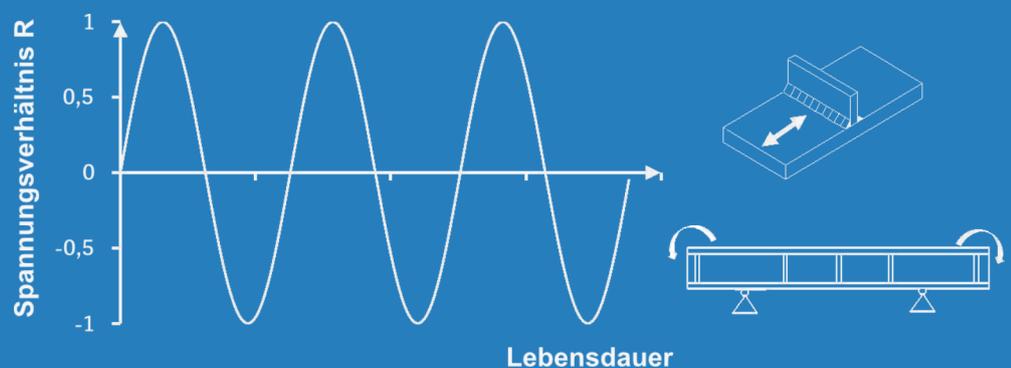


1 / 2018 Forschungsbericht

Entwicklung einer DASt-Richtlinie für Höherfrequente Hämmerver- fahren



Copyright-Klausel mit Haftungsbegrenzung

© Copyright - Klausel

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

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

Für alle Hinweise und Verbesserungsvorschläge ist der Herausgeber stets dankbar.

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt,
Düsseldorf

Vertrieb:
Stahlbau Verlags- und Service GmbH,
Düsseldorf

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1/2018

Forschungsbericht

**Entwicklung einer
DAST-Richtlinie für Höherfre-
quente Hämmerverfahren**

**Development of a DAST-guideline for
High Frequency Mechanical Impact
Treatments**

**Universität Stuttgart
Institut für Konstruktion und Entwurf**

**Karlsruher Institut für Technologie,
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Stein**

**Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann
Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer
Dipl.-Ing. Stephanie Breunig
Dipl.-Ing. Philipp Weidner**

Stahlbau Verlags- und Service GmbH



Forschungsvereinigung	Deutscher Ausschuß für Stahlbau e.V. DAST
Forschungsstelle	Universität Stuttgart Institut für Konstruktion und Entwurf Karlsruher Institut für Technologie, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Stein
IGF-Nummer	17886N
DAST-Homepage	www.stahlbauforschung.de



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für Höherfrequente Hämmerverfahren“, IGF-Projekt Nr. 17886, der Forschungsvereinigung Deutscher Ausschuss für Stahlbau e. V. (DAST), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Kurzzusammenfassung

Trotz intensiver Forschungstätigkeit auf nationaler sowie internationaler Ebene im Bereich der Anwendung Höherfrequenter Hämmerverfahren darf innerhalb Deutschlands der Ermüdungsfestigkeitszuwachs derzeit nicht bei der Bemessung berücksichtigt werden, da eine entsprechende Normengrundlage fehlt. Deshalb beschränkt sich die bisherige Anwendung dieser ermüdungsfestigkeitssteigernden Verfahren auf Projekte mit Zustimmung im Einzelfall. Diese Vorgehensweise erlaubt jedoch keine wirtschaftliche Anwendung dieser Schweißnahtnachbehandlungsverfahren, so dass eine normungsadäquate Regelung wie eine DAST-Richtlinie sowohl für Anbieter des Verfahrens, bemessende Ingenieure und auch für potentielle Anwender auf der Ausführungsseite erstrebenswert ist.

Aus diesem Grund war es ein übergeordnetes Ziel dieses Forschungsvorhabens für den deutschen Anwendungsraum ein gesichertes Bemessungskonzept, das in Einklang mit der harmonisierten europäischen Norm steht, auf Grundlage der existierenden Untersuchungen und Ansätze zur Berücksichtigung der höherfrequenten Hämmerverfahren bei der Bemessung ermüdungsbeanspruchter, geschweißter Konstruktionsdetails zu entwickeln.

Dazu wurden in einem ersten Schritt bestehende experimentelle Untersuchungen zu diversen Einflüssen innerhalb einer umfassenden Literaturrecherche gesammelt und mittels einer eigens dafür entwickelten Datenbank katalogisiert. Basierend auf dieser Datenbank konnten sowohl Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit HFH-behandelter Konstruktionsdetails identifiziert werden, die hinreichend durch Versuchsdaten belegt sind, als auch offene Fragestellung formuliert werden. Mithilfe eines gezielt auf diese Wissenslücken abgestimmten experimentellen Versuchsprogramms wurden weitere Erkenntnisse hinsichtlich relevanter Einflussfaktoren am Konstruktionsdetail der unbelasteten Quersteife gewonnen. Weiterführend dienten numerische Methoden als Entscheidungshilfe zur Abschätzung von Auswirkungen geometrischer Parameter, zu denen keine ausreichende Anzahl an Versuchsdaten vorlagen.

Im weiteren Verlauf erfolgte eine Gegenüberstellung der Auswertung aller gesammelten beeinflussenden Faktoren mit existierenden Bemessungsansätzen. So konnte einerseits Potential, das bisher keine Berücksichtigung fand identifiziert werden, aber auch Lücken aufgedeckt werden. In der Folge ermöglichten diese Vergleichsuntersuchungen zum einen die Verbesserung hinsichtlich der Sicherheit bisheriger Bemessungsvorschläge sowie deren Erweiterung bzw. die Entwicklung von Abgrenzungskriterien. Denn eine eindeutige Definition von Anwendungsbereichen in Bezug auf Beanspruchungszustände als auch die Kategorisierung geeigneter praxisrelevanter geschweißter Konstruktionsdetails ist in diesem Zusammenhang wesentlich.

Abschließend wurde ein Bemessungsvorschlag formuliert, der als Entwurf für eine DAST-Richtlinie zur Berücksichtigung Höherfrequenter Hämmerverfahren bei der Ermüdungsbemessung dient.

„Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht“

Abstract

Despite intensive research activities on national as well as international level in the field of application of High Frequency Mechanical Impact treatments, in Germany the fatigue strength increase can not be taken into account within fatigue dimensioning due to accepted code equivalent rules. Therefore, the use of fatigue strength increasing treatments so far is restricted to projects with agreement on a case-by-case basis. This approach does not allow an economic use of those post-weld treatment methods, so that a code like guideline such as a DAST-guideline is desirable for suppliers of the method, dimensioning engineers and also potential users on executive side.

Therefore it was an overarching goal of the research project to develop, on basis of existing investigations and approaches for consideration of the high frequency mechanical impact treatments when dimensioning fatigue stressed, welded construction details, a secured dimensioning concept for the defined scope of application which is in accordance with the harmonized European standard.

For this in a first step existing experimental investigations on diverse influences were collected in a comprehensive literature research and with an especially for this generated data base cataloged. Based on this data base influences on the fatigue strength of HFMI treated constructional details as well as open questions could be formulated. With the aid of a specifically on these knowledge gaps attuned experimental test program, additional findings with regard to relevant influence factors on the construction detail of an unloaded transverse stiffener were gained. Pursuing numerical methods functioned as decision support to estimate the influences of geometrical parameters of which no sufficient test data existed.

Additionally, a comparison of the evaluation of all collected and influencing factors with existing dimensioning approaches was made. Thereby, the potential, which was not taken into account so far, could be identified and also gaps could be discovered. In consequence, these comparing investigations enabled the improvement regarding to the safety of dimensioning proposals so far and on the other hand their extension or differentiation criteria. An explicit definition of the scope of application with regard to the stress states as well as the categorization of suitable practical relevant welded construction details is significant in this context.

Finally, a design proposal was formulated which functions as a concept for a DAST-guideline to take high frequency mechanical impact treatments into account for fatigue design.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	31
1.1	Anlass des Forschungsprojekts und Notwendigkeit einer bauaufsichtlichen Regelung zur Berücksichtigung der HFH-Verfahren bei der Bemessung.....	32
1.2	Forschungsziele	33
1.3	Lösungsweg zur Erreichung der Forschungsziele.....	35
2	Höherfrequente Hämmerverfahren (HFH).....	39
2.1	Voraussetzungen zur Anwendung der HFH-Verfahren	40
2.2	Wirkungsweise und Wirksamkeit der HFH-Verfahren	41
2.3	Vorstellung der betrachteten und angewandten HFH-Verfahren.....	44
2.3.1	Allgemeines	44
2.3.2	Vorstellung UIT-Verfahren.....	44
2.3.3	Vorstellung HiFIT-Verfahren.....	44
2.3.4	Vorstellung PIT-Verfahren	45
2.3.5	Vergleichbarkeit der HFH-Verfahren	47
3	Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeitssteigerung durch Anwendung der Höherfrequenten Hämmerverfahren.....	51
3.1	Allgemeines	52
3.1.1	Versuchsprogramm	52
3.2	Statistische Auswertung der Ermüdungsversuche	53
3.3	Auswertung einzelner Einflussgrößen	54
3.4	Bauteileinfluss	54
3.4.1	Allgemeines	54
3.4.2	Berücksichtigung des Blechdickeneffekts nach DIN EN 1993-1-9 [16]	57
3.4.3	Aufarbeitung bisheriger Untersuchungen zum Größeneinfluss an HFH-nachbehandelten Konstruktionsdetails.....	59
3.4.4	Experimentelle Untersuchungen an Kleinprüfkörpern	60
3.4.5	Trägerversuche	68
3.5	Einfluss der Mittelspannung	86
3.5.1	Allgemeines	86
3.5.2	Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses bei der Ermüdungsfestigkeitsbemessung nach DIN EN 1993-1-9 [16]	89
3.5.3	Mittelspannungseinfluss bei HFH-nachbehandelten Konstruktionsdetails	89
3.5.4	Experimentelle Untersuchungen zum Mittelspannungseinfluss ($R = -1$)	91
3.6	Mehrstufige Belastung.....	107
3.6.1	Allgemeines	107
3.7	Nachbehandlung bei Vorbelastung	113

3.7.1	Ermüdungsversuche an Kleinprüfkörpern zum Einfluss durch Vorbelastung	113
3.8	Einfluss variierender Behandlungsintensität	116
3.8.1	Ermüdungsversuche an Kleinprüfkörpern zum Einfluss variierender Intensität	116
3.9	Einfluss der Streckgrenze	118
3.9.1	Allgemeines	118
3.9.2	Im Schweißzustand	119
3.9.3	Im HFH-Zustand	119
4	Versuchsdatenbank	121
4.1	Allgemeines	122
4.1.1	Anforderungen an die Datenbank	122
4.1.2	Datensammlung	122
4.1.3	Ermüdungsversuche im Zusammenhang mit HFH-Verfahren, die nicht in die Datenbank aufgenommen wurden	124
4.1.4	Aufbau der Datenbank	124
4.1.5	Beschreibung der Kriterien	127
4.1.6	Eingabe und Abfrage	130
4.2	Datenumfang nach verschiedenen Kriterien	132
4.3	Angaben zur nominellen und reellen Streckgrenze	134
5	Evaluierung der Bemessungskonzepte	137
5.1	Vorliegende Bemessungskonzepte	138
5.1.1	Allgemeines	138
5.1.2	Bemessungsvorschlag nach Dürr [30]	138
5.1.3	Bemessungsvorschlag Weich [99] / Refresh [90]	139
5.1.4	Bemessungsvorschlag nach IIW-Recommendations [68]	141
5.2	Quersteife - Evaluierung der Bemessungsansätze nach Einflusskriterien	144
5.2.1	Mittelspannungseinfluss- und Streckgrenzeinfluss	144
5.2.2	Gegenüberstellung zur IIW- Empfehlung	153
5.2.3	Bauteileinfluss	154
5.2.4	Blechdickeneffekt	156
5.3	Stumpfnah – Evaluierung der Bemessungsansätze nach Einflüssen	161
5.3.1	Mittelspannungs- und Streckgrenzeinfluss	161
5.3.2	Gegenüberstellung zur IIW-Empfehlung	170
5.3.3	Bauteileffekt	171
5.3.4	Blechdickeneffekt	171
5.4	Längssteife – Evaluierung der Bemessungsansätze nach Einflüssen	177
5.4.1	Mittelspannungs- und Streckgrenzeinfluss	177

5.4.2	Blechdickeneffekt	183
5.5	Evaluierung von kerbdetailübergreifenden Einflüssen.....	187
5.5.1	Einfluss mehrstufiger Belastung / Überlasten.....	187
5.5.2	Vorbelastung	192
5.5.3	Einfluss aus zusätzlichem Strahlen	195
5.6	Allgemeine Schlussfolgerungen	197
5.6.1	Wöhlerlinienneigung	197
6	Numerische Untersuchungen.....	199
6.1	Allgemeines	200
6.2	Prüfkörpercharakterisierung und Begleituntersuchungen.....	200
6.2.1	Prüfkörpergeometrie.....	200
6.2.2	Lokale Nahtgeometrie	202
6.2.3	Imperfektionen.....	202
6.2.4	Makoschliffe und Härtemessungen	203
6.2.5	Dehnungsmessungen.....	204
6.3	Numerische Untersuchungen	206
6.3.1	Strukturspannungskonzept.....	206
6.3.2	Modellbildung für Strukturspannungsberechnung	207
6.3.3	Validierung des Strukturspannungsmodells	208
6.3.4	Kerbspannungskonzept.....	209
6.3.5	Modellbildung für Kerbspannungskonzept	210
6.3.6	Numerische Berechnungen zur Quersteife	211
7	Vorschlag für eine DASt-Richtlinie zur Berücksichtigung der HFH-Verfahren beim Ermüdungsnachweis	217
7.1	Vorbemerkungen und Anforderung	218
7.2	Nachweis mit Nennspannungskonzept.....	218
7.3	Aufbereitung der Ermüdungsfestigkeit für angewandte und erprobte geschweißte Konstruktionsdetails mit HFH-Behandlung in Tabellenform	219
7.3.1	Erläuterung zur Herleitung der tabellierten Werte für die durch HFH-Anwendung verbesserten Ermüdungsfestigkeiten	219
7.3.2	Anwendung des Bemessungskonzepts in tabellierter Form.....	220
7.4	Voraussetzungen in Abhängigkeit der Ausführung der Schweißnaht, für die Anwendung der Tabelle.....	227
7.4.1	Anforderungen an die zu behandelnde Schweißnaht.....	227
7.4.2	Definition der geeigneten Konstruktionsdetails und Variationen	227
7.4.3	Untersuchungen zum Wurzelriss der unbelasteten Quersteife (Dürr [30], S.158).....	230
7.4.4	Schweißnahtwurzelsversagen der unbelasteten Längssteife	230
8	Zusammenfassung und Ausblick	231

8.1	Zusammenfassung der Untersuchungen	231
8.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung und deren Anwendung auf das Bemessungskonzept.....	232
8.3	Ausblick.....	233
9	Literaturverzeichnis	235
10	Danksagung.....	243
11	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen	245
Anhang A - Vorgehensweise der angewandten statistischen Auswertung		247
Anhang B - Dokumentation der Versuchskörperfertigung		251
Anhang C - Versuchsergebnisse der Kleinbauteilversuche		273
Anhang D - Versuchsdurchführung und -ergebnisse der Trägerversuche		295

CONTENT

1	Introduction.....	31
1.1	Motivation of research project and need of regulation through building authorities for the consideration of HFMI-treatments on fatigue design.....	32
1.2	Aims of the research project.....	33
1.3	Approach to achieve the research objectives.....	35
2	High Frequency Mechanical Impact Treatment (HFMI)	39
2.1	Requirements for the application of HFMI-treatment.....	40
2.2	Mechanism and effectiveness of HFH-treatment.....	41
2.3	Introduction of investigated and applied HFMI-methods	44
2.3.1	General.....	44
2.3.2	Introduction of UIT-treatment.....	44
2.3.3	Introduction of HiFIT-treatment.....	44
2.3.4	Introduction of PIT-treatment.....	45
2.3.5	Comparison of HFMI-treatment methods	47
3	Influences on the improvement of fatigue strength with application of High Frequency Mechanical Impact treatments.....	51
3.1	General.....	52
3.1.1	Test program	52
3.2	Statistical evaluation of fatigue tests	53
3.3	Evaluation of single influencing effects.....	54
3.4	Size effect.....	54
3.4.1	General.....	54
3.4.2	Consideration of plate thickness effects according to DIN EN 1993-1-9 [16]..	57
3.4.3	Assessment of previous studies about the size effect on HFMI-treated construction details.....	59
3.4.4	Experimental Investigations on small scale specimens.....	60
3.4.5	Girder tests	68
3.5	Influence of mean stress	86
3.5.1	General.....	86
3.5.2	Consideration of the mean stress effects within fatigue assessment according to DIN EN 1993-1-9 [16].....	89
3.5.3	Mean stress effect for HFMI-treated construction details	89
3.5.4	Experimental investigations on mean stress influence ($R = 0.1$).....	91
3.6	Load.....	107
3.6.1	General.....	107
3.7	Post-treatment with preload.....	113
3.7.1	Small scale fatigue tests for preload effects	113

3.8	Influence of varying intensity of HFMI-treatment.....	116
3.8.1	Small scale fatigue tests on the influence under varying intensity	116
3.9	Influence of yield strength	118
3.9.1	General	118
3.9.2	As-welded condition	119
3.9.3	HFH-condition	119
4	Data base of tests	121
4.1	General.....	122
4.1.1	Requirements concerning the data base.....	122
4.1.2	Collection of data	122
4.1.3	Fatigue tests, that were not taken into account for the data bank.....	124
4.1.4	Structure of the data base	124
4.1.5	Description of criteria	127
4.2	Amount of data for different criteria	132
4.3	Information on nominal and real yield strength	134
5	Evaluation of design concepts	137
5.1	Existing design approaches	138
5.1.1	General	138
5.1.2	Design approach according to Dürr [30]	138
5.1.3	Design approach according to Weich [99] / Refresh [90].....	139
5.1.4	Design approach according to IIW-Recommendation [68].....	141
5.2	Transverse attachment - Evaluation of design approaches regarding influencing factors.....	144
5.2.1	Mean stress and yield strength effects.....	144
5.2.2	Comparison to IIW-Recommendations	153
5.2.3	Size effect	154
5.2.4	Plate thickness effect	156
5.3	Butt weld – Evaluation of design approaches regarding influencing factors	161
5.3.1	Mean stress and yield strength effects.....	161
5.3.2	Comparison to IIW-Recommendation	170
5.3.3	Size effect	171
5.3.4	Plate thickness effect	171
5.4	Longitudinal attachment – Evaluation of design approaches regarding influencing factors.....	177
5.4.1	Mean stress and yield strength effects.....	177
5.4.2	Plate thickness effect	183
5.5	Evaluation of influences non-dependent of construction detail	187
5.5.1	Effect of multistage loading / overloads.....	187

5.5.2	Fatigue preloading.....	192
5.5.3	Effect of blast cleaning	195
5.6	General conclusions	197
5.6.1	Slope of the S-N curve	197
6	Numerical investigations	199
6.1	General.....	200
6.2	Characterisation of specimens and additional studies.....	200
6.2.1	Dimensions of specimens.....	200
6.2.2	Dimensions of weld	202
6.2.3	Imperfections	202
6.2.4	Macro sections	203
6.2.5	Strain gauge measurements	204
6.3	Numerical analyses	206
6.3.1	Structural stress approach.....	206
6.3.2	Numerical modelling for determination of structural stresses.....	207
6.3.3	Validation of FE-Model for determination of structural stress.....	208
6.3.4	Notch stress approach.....	209
6.3.5	Numerical modelling for notch stress approach	210
6.3.6	Numerical studies for transverse attachment	211
7	Proposal of a DAST-guideline to consider the HFMI-treatments for fatigue verification.....	217
7.1	Preliminary remarks and requirements.....	218
7.2	Verification based on nominal stress concept	218
7.3	Concept of tables for applied and proven welded construction details treated by HFMI.....	219
7.3.1	Explanation of derivation of tabulated values for HFMI-improved fatigue strengths.....	219
7.3.2	Application of tabulated design concept	220
7.4	Requirements depending on the execution of weld and application of tables	227
7.4.1	Requirements for the HFMI-treated weld	227
7.4.2	Definition of appropriate construction details and variants	227
7.4.3	Investigations on root failure for unloaded transverse attachment.....	230
7.4.4	Weld root failure for unloaded longitudinal attachment	230
8	Conclusions and outlook	231
8.1	Conclusions of investigations	231
8.2	Conclusion of Results of investigation and application to design concept.....	232
8.3	Outlook	233
9	Bibliography.....	235
10	Acknowledgement.....	243

11	List of publications related to the project.....	245
	Attachment A – Procedure of applied statistical evaluation	247
	Attachment B – Documentation of specimen fabrication	251
	Attachment C – Test results of small scale specimens	273
	Attachment D – Experimental procedure and test results of beam tests	295

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1: INTEGRALES KONZEPT FÜR HFH IM RAHMEN DER BAUAUFSICHTLICHEN REGELUNGEN.....	32
ABBILDUNG 1-2: ERHÖHUNGSFAKTOREN FÜR DIE KERBFALLKLASSE DURCH HÖHERFREQUENTES HÄMMERN NACHBEHANDELTEN SCHWEIßNÄHTE IN ABHÄNGIGKEIT VOM SPANNUNGSVERHÄLTNISS R NACH [40].....	34
ABBILDUNG 1-3: ARBEITSDIAGRAMM	35
ABBILDUNG 2-1: HFH-GEEIGNETE KONSTRUKTIONSDetails	40
ABBILDUNG 2-2: HFH-UNGEEIGNETE KONSTRUKTIONSDetails.....	41
ABBILDUNG 2-3: EIGENSPANNUNGMESSUNGEN SENKRECHT ZUR SCHWEIßNAHT IN DIE TIEFE AM S355 UND S690 AUS [30]	42
ABBILDUNG 2-4: VERGLEICH DER QUEREIGENSPANNUNGEN AN DER OBERFLÄCHE AM S690 FÜR UNBEHANDELT, UIT-, HiFIT UND HFH UND ANSCHLIEßEND SPANNUNGSARMGEGLÜHTE ZUSTÄNDE [99].....	43
ABBILDUNG 2-5: HiFIT-GERÄT (BILDQUELLE: HiFIT VERTRIEBS GMBH) UND KONTROLLE DER EINDRUCKTIEFE MIT LEHRE NACH [68], (BILDQUELLE: HiFIT VERTRIEBS GMBH)	45
ABBILDUNG 2-6: UIT-AUSRÜSTUNG [30] UND ZUGEHÖRIGE NACHBEHANDLUNGSSPUR AUS [99]	46
ABBILDUNG 2-7: HiFIT-HANDGERÄT [50] UND ZUGEHÖRIGE NACHBEHANDLUNGSSPUR AM S355	46
ABBILDUNG 2-8: PIT-AUSRÜSTUNG [79] UND ZUGEHÖRIGE NACHBEHANDLUNGSSPUR AM S355	46
ABBILDUNG 2-9: VERGLEICH DER MITTELWERTE DER EIGENSPANNUNGMESSUNGEN AN DER OBERFLÄCHE DES S235 AUS [61]	48
ABBILDUNG 2-10: VERGLEICH DER MITTELWERTE DER EIGENSPANNUNGMESSUNGEN IN DIE TIEFE DES S235 AUS [61]	48
ABBILDUNG 3-1: SPEZIFIZIERUNG DES GRÖßENEINFLUSSES, DARSTELLUNG AUS [3].....	55
ABBILDUNG 3-2: DARSTELLUNG DES SPANNUNGSMECHANISCHEN GRÖßENEINFLUSSES NACH [78].....	56
ABBILDUNG 3-3: ZUORDNUNG VERSCHIEDENER VERSUCHSTYPEN AUF ARTEN DER GRÖßENEINFLÜSSE AM BEISPIEL UNBELASTETE QUERSTEIFE [3]	56
ABBILDUNG 3-4: AUSWERTUNG AUS [55] ZU SCHWINGVERSUCHE FÜR UNTERSCHIEDLICHE QUERANSCHLÜSSE AUS GURNEY [42].....	57
ABBILDUNG 3-5: AUSZUG DES KERBFALLS QUERBELASTETER STUMPFSTOß AUS DIN EN 1993-1-9 [16] TAB. 8.3	58
ABBILDUNG 3-6: AUSZUG DER KERBFÄLLE UNBELASTETE QUERSTEIFE IN ABHÄNGIGKEIT DES SCHWEIßNAHTÜBERGANGSABSTANDS AUS DIN EN 1993-1-9 [16]	59
ABBILDUNG 3-7: AUSZUG DER KERBFÄLLE UNBELASTETE LÄNGSSTEIFE IN ABHÄNGIGKEIT DER STEIFENLÄNGE AUS DIN EN 1993-1-9 [16]	59
ABBILDUNG 3-8: ANHEFTEN DER STEIFEN UND ANBRINGEN VON AN- UND AUSLAUFBLECHEN.....	61
ABBILDUNG 3-9: PARALLELES SCHWEIßEN DER KEHLNÄHTE BEIDSEITS DER STEIFE MIT WELDYCAR	62
ABBILDUNG 3-10: ABMESSUNGEN DER KLEINPRÜFKÖRPER.....	62
ABBILDUNG 3-11: KLEINPRÜFKÖRPER, QUERSTEIFE, S355J2+N, ANSICHT (OBEN), DRAUFSICHT (UNTEN)	63
ABBILDUNG 3-12: KLEINPRÜFKÖRPER: HiFIT-BEHANDLUNG (LINKS) UND PIT-BEHANDLUNG (RECHTS)	64
ABBILDUNG 3-13: HFH-BEHANDELTE PRÜFKÖRPER MIT SEITLICHEM GRAT: HiFIT (LINKS) UND PIT (RECHTS).....	64

ABBILDUNG 3-14: ERMÜDUNGSERSUCH AN QUERSTEIFE AUF HOCHFREQUENZPULSATOR AM KIT	65
ABBILDUNG 3-15: QUERSTEIFE MIT ERMÜDUNGSRISS AM NAHTÜBERGANG (ZUSTAND AW, LINKS) UND HFH-BEHANDELTE QUERSTEIFE MIT GRUNDMATERIALBRUCH (RECHTS).....	66
ABBILDUNG 3-16: HiFIT-BEHANDELTE QUERSTEIFE MIT ERMÜDUNGSRISS AM NAHTÜBERGANG (LINKS) UND PIT-BEHANDELTE QUERSTEIFE MIT ERMÜDUNGSRISS AM NAHTÜBERGANG (RECHTS).....	66
ABBILDUNG 3-17: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIEN FÜR DIE QUERSTEIFE: ZUSTAND AW (DAST_2_E-AW) UND HFH-BEHANDELT (DAST_2_E_HFH), R = 0,1	67
ABBILDUNG 3-18: DETAILAUSBILDUNG BEI EINGESCHWEIßTEN QUERSTEIFEN IN TRÄGERQUERSCHNITTE [3].....	69
ABBILDUNG 3-19: PRAXISTEST MIT PIT-GERÄT AN GESCHWEIßTEM TRÄGER MIT QUERSTEIFE UND KREISFÖRMIGEN FREISCHNITT R = 30 MM [3]	70
ABBILDUNG 3-20: ANHEFTEN UND EINSCHWEIßEN DER QUERSTEIFEN IN WANNENLAGE [3]	70
ABBILDUNG 3-21: NACHBEHANDLUNG MIT HiFIT DURCH DIE FIRMA <i>DYNATEC GMBH</i> [3]	71
ABBILDUNG 3-22: NACHBEHANDLUNG MIT PIT DURCH DIE FIRMA <i>PITEC GMBH</i> [3]	71
ABBILDUNG 3-23: ANORDNUNG DER DEHNMESSSTREIFEN AM ZUGGURT NAHE DER QUERSTEIFE [3].	74
ABBILDUNG 3-24: VERSUCHSAUFBAU DER TRÄGERSERIE T2 [3].....	75
ABBILDUNG 3-25: GELENKIGER LAGERPUNKT UND LASTEINLEITUNGSPUNKT DER TRÄGERSERIE T2 [3]	76
ABBILDUNG 3-26: ANPASSUNG DER NENNSPANNUNGSDEFINITION AM TRÄGERQUERSCHNITT NACH HELMS [48] AUF GEWALZTES HEA260 PROFIL MIT EINGESCHWEIßTER QUERSTEIFE [3].....	77
ABBILDUNG 3-27: VERSAGEN DER TRÄGERSERIE T2 AM NAHTÜBERGANG DER QUERSTEIFE [3]	79
ABBILDUNG 3-28: DRAUFSICHT AUF RISSWACHSTUM AM SCHWEIßNAHTÜBERGANG DER QUERSTEIFE (T2.17-S3R+) [3]	79
ABBILDUNG 3-29: BRUCHBILD VERSUCHSTRÄGER T1 AW [3]	80
ABBILDUNG 3-30: BRUCHBILD VERSUCHSTRÄGER T1 AW – DETAILANSICHT [3]	80
ABBILDUNG 3-31: : BRUCHBILD VERSUCHSTRÄGER 2.18 – STEIFE NR. 5 [3].....	81
ABBILDUNG 3-32: : BRUCHBILD VERSUCHSTRÄGER 2.18 – STEIFE NR. 5 – DETAILANSICHT [3].....	81
ABBILDUNG 3-33: BRUCHFLÄCHE MIT ERMÜDUNGSANRISS UND NAHTANSATZSTELLE [3]	82
ABBILDUNG 3-34: VERSUCHSERGEBNISSE DER TRÄGER-ZUGSCHWELLVERSUCHE R = 0,1 [3].....	83
ABBILDUNG 3-35: AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE DER TRÄGER-ZUGSCHWELLVERSUCHE R = 0,1 UNTER FIXER NEIGUNG (M = 5) [3].....	85
ABBILDUNG 3-36: AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE DER TRÄGER-ZUGSCHWELLVERSUCHE R = 0,1 UNTER FREIER NEIGUNG (M = 4,4) [3].....	85
ABBILDUNG 3-37: GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE DER TRÄGERVERSUCHSSERIE T2 UND KLEINVERSUCHSSERIE E2 [3].....	86
ABBILDUNG 3-38: MITTELSPANNUNGEN IM ÜBERBLICK.....	87
ABBILDUNG 3-39: ERWEITERUNG DER DARSTELLUNG AUS ABBILDUNG 3-40 AUF EIGENSPANNUNGSLOSE BAUTEILE FÜR WECHSELBEANSPRUCHUNG (01), ZUGSCHWELLBEANSPRUCHUNG (02) NACH THEORIE VON GURNEY [41].....	88
ABBILDUNG 3-40: ÜBERLAGERUNG VON LAST- UND EIGENSPANNUNGEN FÜR WECHSELBEANSPRUCHTE (A) UND DRUCKSCHWELLBEANSPRUCHTE (B) GESCHWEIßTE BAUTEILE AUS [63] NACH THEORIE VON GURNEY [41].....	88
ABBILDUNG 3-41: AUSZUG AUS DIN EN 1993-1-9 [16] ZUR ERMITTLUNG DER MODIFIZIERTEN SPANNUNGSSCHWINGBREITE BEI NICHT GESCHWEIßTEN UND SPANNUNGSARM GEGLÜHTEN GESCHWEIßTEN KONSTRUKTIONEN	89

ABBILDUNG 3-42: ERWEITERUNG DER DARSTELLUNG NACH [3] AUS ABBILDUNG 3-40 AUF GESCHWEIBTE BAUTEILE UNTER DRUCKEIGENSINNUNGEN IN HÖHE DER STRECKGRENZE FÜR WECHSELBEANSPRUCHUNG (C), ZUGSCHWELLBEANSPRUCHUNG (D) UND DRUCKSCHWELLBEANSPRUCHUNG (E) NACH THEORIE VON GURNEY [41]	90
ABBILDUNG 3-43: HFH-BEHANDELTE QUERSTEIFE MIT ERMÜDUNGRSRISS IM GRUNDMATERIAL, R = -1	91
ABBILDUNG 3-44: ABMESSUNGEN DER TAILLIERTEN KLEINPRÜFKÖRPER.....	92
ABBILDUNG 3-45: QUERSTEIFE TAILLIERT UND NICHT TAILLIERT (LINKS), ERMÜDUNGRSRISS AM HFH- BEHANDELTEN NAHTÜBERGANG EINES TAILLIERTEN PRÜFKÖRPERS (RECHTS).....	92
ABBILDUNG 3-46: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIEN FÜR DIE QUERSTEIFE: ZUSTAND AW (DAST_1_AW) UND HFH-BEHANDELT (DAST_1_HFH), R = -1	93
ABBILDUNG 3-47: NACHBEHANDLUNG DURCH DIE FIRMEN <i>PITEC GMBH</i> UND <i>DYNATEC GMBH</i>	94
ABBILDUNG 3-48: SCHEMA - DRAUFSICHT VERSUCHSAUFBAU [3].....	95
ABBILDUNG 3-49: SCHEMA - ANSICHT VERSUCHSAUFBAU [3]	95
ABBILDUNG 3-50: ERZEUGTE BIEGELINIE INFOLGE AKTIVIERUNG VON SCHALUNGRÜTTLER [3].....	96
ABBILDUNG 3-51: SCHALUNGRÜTTLER DER FIRMA <i>KNAUER ENGINEERING INDUSTRIEANLAGEN GMBH</i> & <i>Co.KG</i> [3]	96
ABBILDUNG 3-52: SCHALUNGRÜTTLER DER FIRMA <i>KNAUER ENGINEERING INDUSTRIEANLAGEN GMBH</i> & <i>Co.KG</i> [3]	97
ABBILDUNG 3-53: MESSTECHNIK BEI DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG [3].....	98
ABBILDUNG 3-54: VERSUCHSAUFBAU [3].....	98
ABBILDUNG 3-55: MESSEINHEIT MIT VERSUCHSAUFBAU [3].....	99
ABBILDUNG 3-56: RISSBILDUNG BEI UNZUREICHENDER NACHBEHANDLUNG AM STEG [3]	100
ABBILDUNG 3-57: TYPISCHE RISSBILDUNG AN UNTERGURTSCHWEIBTNAHT [3].....	100
ABBILDUNG 3-58: VERSUCHSERGEBNISSE DER WECHSELLASTVERSUCHE GETRENNT NACH NACHBEHANDLUNGSZUSTAND [3]	102
ABBILDUNG 3-59: AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE DER WECHSELBEANSPRUCHTEN TRÄGERVERSUCHE R = -1,0 UNTER FREIER NEIGUNG (M = 2,2) [3].....	103
ABBILDUNG 3-60: AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE DERWECHSELBEANSPRUCHTEN TRÄGERVERSUCHE R = -1,0 UNTER FIXER NEIGUNG (M = 5) [3].....	104
ABBILDUNG 3-61: GEGENÜBERSTELLUNG DER TRÄGERSERIEN T1 UND T2 UNTER MODIFIZIERUNG DER SPANNUNGSSCHWINGBREITEN DER SERIE T1 [3].....	105
ABBILDUNG 3-62: GEGENÜBERSTELLUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE DER TRÄGERSERIEN T1 UND KLEINVERSUCHSSERIE E1 [3].....	106
ABBILDUNG 3-63: LASTFOLGE M1 – ZUGSCHWELLEND E ÜBERLASTEN VOR ERMÜDUNGSVERSUCHSBEGINN.....	107
ABBILDUNG 3-64: LASTFOLGE M1 – KRAFT-MASCHINENWEG-AUFZEICHNUNG	108
ABBILDUNG 3-65: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIEN FÜR DIE QUERSTEIFE, LASTFOLGE M1: ZUSTAND AW (DAST_3_M1_AW) UND HFH-BEHANDELT (DAST_3_M1_HFH), R = 0,1	109
ABBILDUNG 3-66: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIE FÜR DIE QUERSTEIFE: HFH-BEHANDELTE REFERENZPRÜFKÖRPER (DAST_2_E_HFH) UND HFH-BEHANDELTE QUERSTEIFE MIT LASTFOLGE M1 (DAST_3_M1_HFH), R = 0,1	110
ABBILDUNG 3-67: LASTFOLGE M2 – DRUCKSCHWELLEND E ÜBERLASTEN VOR ERMÜDUNGSVERSUCHSBEGINN.....	111
ABBILDUNG 3-68: LASTFOLGE M2 – KRAFT-MASCHINENWEG-AUFZEICHNUNG	111

ABBILDUNG 3-69: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIEN FÜR DIE QUERSTEIFE, LASTFOLGE M2: ZUSTAND AW (DAST_3_M2_AW) UND HFH-BEHANDELT (DAST_3_M2_HFH), R = 0,1.....	112
ABBILDUNG 3-70: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIE FÜR DIE QUERSTEIFE: HFH-BEHANDELTE REFERENZPRÜFKÖRPER (DAST_2_E_HFH) UND HFH-BEHANDELTE QUERSTEIFE MIT LASTFOLGE M2 (DAST_3_M2_HFH), R = 0,1	113
ABBILDUNG 3-71: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIE FÜR DIE QUERSTEIFE IM ZUSTAND AW: VORGEHENSWEISE ZUR BESTIMMUNG DER ERMÜDUNGSVORBELASTUNG.....	114
ABBILDUNG 3-72: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIE FÜR DIE QUERSTEIFE: REFERENZPRÜFKÖRPER IM ZUSTAND AW (DAST_2_E_AW) UND HFH-BEHANDELTE QUERSTEIFE NACH VORBELASTUNG (DAST_5_E_V_HFH), R = 0,1.....	116
ABBILDUNG 3-73: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIE FÜR DIE QUERSTEIFE DER REFERENZPRÜFKÖRPER IM ZUSTAND HFH-BEHANDELT (DAST_2_E_HFH) UND ERGEBNISSE HFH-BEHANDELTER QUERSTEIFEN MIT VARIIRTER BEHANDLUNGSINTENSITÄT (DAST_2_E_HFH_I_HOCH-NIEDRIG), R = 0,1	118
ABBILDUNG 3-74: EINFLUSS UNTERSCHIEDLICHER STRECKGRENZEN AM QUERBELASTETEN STUMPFSTOß AUS [99]	120
ABBILDUNG 4-1: BIEGEBEANSPRUCHTE PRÜFKÖRPER AUS [5]	124
ABBILDUNG 4-2: ÜBERSICHT ÜBER KRITERIEN UND PARAMETER DER DATENBANK.....	126
ABBILDUNG 4-3: ARTEN DER VORBELASTUNG [3]	129
ABBILDUNG 4-4: BESCHREIBUNG DER BEMERKUNGEN	130
ABBILDUNG 4-5: EINGABE-FORMULAR	131
ABBILDUNG 4-6: DARSTELLUNG DER ANZAHL DER DATENBANKSÄTZE NACH KONSTRUKTIONSDetail	132
ABBILDUNG 4-7: DARSTELLUNG DER ANZAHL DER DATENBANKSÄTZE NACH STAHLGÜTE	133
ABBILDUNG 4-8: DARSTELLUNG DER ANZAHL DER DATENBANKSÄTZE NACH SPANNUNGSVERHÄLTNIS R	134
ABBILDUNG 4-9: VERGLEICH NOMINELLER ZU REALER STRECKGRENZE VERWENDETER MATERIALIEN EINIGER LITERATURSTELLEN.....	135
ABBILDUNG 5-1: LOKALER BEMESSUNGSVORSCHLAG NACH WEICH [99].....	140
ABBILDUNG 5-2: ANWENDUNGSBEREICH UND VERBESSERUNGSZUWACHS DURCH HFH NACH IIW-EMPFEHLUNGEN [68].....	141
ABBILDUNG 5-3: STAHLGÜTENABHÄNGIGKEIT NACH IIW-EMPFEHLUNGEN [68]	142
ABBILDUNG 5-4: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS NACH IIW-EMPFEHLUNGEN [68].....	142
ABBILDUNG 5-5: MINDESTLASTZYKLEN NACH IIW-EMPFEHLUNGEN [68].....	142
ABBILDUNG 5-6: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN UNBEHANDELTER QUERSTEIFE AM S355	145
ABBILDUNG 5-7: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN HFH-BEHANDELTER QUERSTEIFE AM S355	146
ABBILDUNG 5-8: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN UNBEHANDELTER QUERSTEIFE AM S690	146
ABBILDUNG 5-9: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN HFH-BEHANDELTER QUERSTEIFE AM S690	147
ABBILDUNG 5-10: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS DER QUERSTEIFE (M = VAR.) [3]	149
ABBILDUNG 5-11: STRECKGRENZENEINFLUSS AN UNBEHANDELTER QUERSTEIFE UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS R = 0,1	151
ABBILDUNG 5-12: STRECKGRENZENEINFLUSS AN HFH-BEHANDELTER QUERSTEIFE UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS R = 0,1	151
ABBILDUNG 5-13: STRECKGRENZENEINFLUSS AN UNBEHANDELTER UND HFH-BEHANDELTER QUERSTEIFE UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS R = 0,1 UND FREIER WÖHLERLINIENNEIGUNG M _{FREI} [3]	152

ABBILDUNG 5-14: STRECKGRENZENEINFLUSS AN UNBEHANDELTER UND HFH-BEHANDELTER QUERSTEIFE UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS $R = -1,0$ UND FREIER WÖHLERLINIENNEIGUNG M_{FREI} [3]	153
ABBILDUNG 5-15: STRECKGRENZEN- UND MITTELSPANNUNGSEINFLUSS ANHAND DER GEGENÜBERSTELLUNG ZU DEN ERMÜDUNGSFESTIGKEITEN DER IIW-EMPFEHLUNGEN AN DER HFH-NACHBEHANDELTEN QUERSTEIFE ($M_{HFH} = FIX$) [3].....	154
ABBILDUNG 5-16: EINORDNUNG DER TRÄGERVERSUCHSERGEBNISSE IM UNBEHANDELTEN ZUSTAND [3]	155
ABBILDUNG 5-17: EINORDNUNG DER TRÄGERVERSUCHSERGEBNISSE IM HFH-BEHANDELTEN ZUSTAND [3].....	156
ABBILDUNG 5-18: EINORDNUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE IM HFH-BEHANDELTEN ZUSTAND UNTER VARIATION DER BLECHDICKE AM S355	157
ABBILDUNG 5-19: EINORDNUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE IM HFH-BEHANDELTEN ZUSTAND UNTER VARIATION DER BLECHDICKE AM S460	158
ABBILDUNG 5-20: EINORDNUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE IM HFH-BEHANDELTEN ZUSTAND UNTER VARIATION DER BLECHDICKE AM S690	158
ABBILDUNG 5-21: BLECHDICKENEINFLUSS AN DER HFH-BEHANDELTEN QUERSTEIFE S355, S460 UND S690 UNTER AUSWERTUNG MIT FIXER NEIGUNG [3]	160
ABBILDUNG 5-22: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN UNBEHANDELTEM STUMPFSTOß AM S355	162
ABBILDUNG 5-23: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN HFH-BEHANDELTEM STUMPFSTOß AM S355.....	162
ABBILDUNG 5-24: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN UNBEHANDELTEM STUMPFSTOß AM S690	163
ABBILDUNG 5-25: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN HFH-BEHANDELTEM STUMPFSTOß AM S690.....	164
ABBILDUNG 5-26: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS DES STUMPFSTOßES ($M = FREI$) [3].....	166
ABBILDUNG 5-27: STRECKGRENZENEINFLUSS AN UNBEHANDELTEM STUMPFSTOß UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS $R = 0,1$	167
ABBILDUNG 5-28: STRECKGRENZENEINFLUSS AN HFH-BEHANDELTER STUMPFSTOß UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS $R = 0,1$	168
ABBILDUNG 5-29: STRECKGRENZENEINFLUSS AN UNBEHANDELTEM UND HFH-BEHANDELTEM STUMPFSTOß UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS $R = 0,1$ UND FREIER WÖHLERLINIENNEIGUNG $M_{AW} = M_{HFH} = FREI$ [3].....	169
ABBILDUNG 5-30: STRECKGRENZENEINFLUSS AN UNBEHANDELTEM UND HFH-BEHANDELTEM STUMPFSTOß UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS $R = -1,0$ UND FREIER WÖHLERLINIENNEIGUNG $M_{AW} = M_{HFH} = FREI$ [3].....	169
ABBILDUNG 5-31: STRECKGRENZEN- UND MITTELSPANNUNGSEINFLUSS ANHAND DER GEGENÜBERSTELLUNG ZU DEN ERMÜDUNGSFESTIGKEITEN DER IIW-EMPFEHLUNGEN AM HFH-NACHBEHANDELTEN STUMPFSTOß ($M_{HFH} = FIX$) [3]	170
ABBILDUNG 5-32: BLECHDICKENEINFLUSS AN UNBEHANDELTEM STUMPFSTOß AUS S355.....	171
ABBILDUNG 5-33: BLECHDICKENEINFLUSS AM HFH-BEHANDELTEN STUMPFSTOß AUS S355	172
ABBILDUNG 5-34: BLECHDICKENEINFLUSS AN UNBEHANDELTEM STUMPFSTOß AUS S690.....	173
ABBILDUNG 5-35: BLECHDICKENEINFLUSS AM HFH-BEHANDELTEN STUMPFSTOß AUS S690	174
ABBILDUNG 5-36: BLECHDICKENEINFLUSS AM HFH-BEHANDELTEN STUMPFSTOß AUS S355 UND S690 UNTER AUSWERTUNG MIT FIXER NEIGUNG [3]	176
ABBILDUNG 5-37: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN HFH-UND UNBEHANDELTER LÄNGSSTEIFE AM S355	178
ABBILDUNG 5-38: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN HFH-UND UNBEHANDELTER LÄNGSSTEIFE AM S690.....	178

ABBILDUNG 5-39: MITTELSPANNUNGSEINFLUSS DER LÄNGSSTEIFE ($M = \text{VAR}$) [3].....	180
ABBILDUNG 5-40: STRECKGRENZENEINFLUSS AN UNBEHANDELTER LÄNGSSTEIFE UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS $R = 0,1$	181
ABBILDUNG 5-41: STRECKGRENZENEINFLUSS AN HFH-BEHANDELTER LÄNGSSTEIFE UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS $R = 0,1$	181
ABBILDUNG 5-42: STRECKGRENZENEINFLUSS AN UNBEHANDELTER UND HFH-BEHANDELTER LÄNGSSTEIFE UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS $R = 0,1$ UND FREIER WÖHLERLINIENNEIGUNG $M_{\text{AW}} = M_{\text{HFH}} = \text{FREI}$ [3].....	182
ABBILDUNG 5-43: STRECKGRENZENEINFLUSS AN UNBEHANDELTER UND HFH-BEHANDELTER LÄNGSSTEIFE UNTER SPANNUNGSVERHÄLTNIS $R = -1,0$ UND FREIER WÖHLERLINIENNEIGUNG $M_{\text{AW}} = M_{\text{HFH}} = \text{FREI}$ [3].....	182
ABBILDUNG 5-44: GEGENÜBERSTELLUNG STRECKGRENZEN- UND MITTELSPANNUNGSEINFLUSS AN HFH-BEHANDELTER LÄNGSSTEIFE UNTER FIXER WÖHLERLINIENNEIGUNG $M_{\text{HFH}} = \text{FREI}$ [3]	183
ABBILDUNG 5-45: BLECHDICKENEINFLUSS AN DER HFH-BEHANDELTEN LÄNGSSTEIFE AUS S355 ...	184
ABBILDUNG 5-46: BLECHDICKENEINFLUSS AN DER HFH-BEHANDELTEN LÄNGSSTEIFE AUS S690 ...	184
ABBILDUNG 5-47: BLECHDICKENEINFLUSS AN DER LÄNGSSTEIFE AUS S355 UND S690 UNTER AUSWERTUNG MIT FIXER NEIGUNG [3]	186
ABBILDUNG 5-48: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIEN FÜR STUMPFSTÖßE AUS S355J2: VERGLEICH HFH-BEHANDELTER UND ANSCHLIEßEND MIT EINER QUASISTATISCHEN ZUG- BZW. DRUCKLAST BEANSPRUCHTEN MIT AUSSCHLIEßLICH HFH-BEHANDELTEN REFERENZPRÜFKÖRPERN, $R = 0,1$ [90]	188
ABBILDUNG 5-49: ERREICHBARE VERBESSERUNG HFH-BEHANDELTER PRÜFKÖRPER NACH AUFBRINGEN EINER ÜBERLAST VOR VERSUCHSBEGINN, AUSWERTUNG MIT FREIER NEIGUNG UND REALER STRECKGRENZE, $R = 0,1$	191
ABBILDUNG 5-50: ERREICHBARE VERBESSERUNG HFH-BEHANDELTER PRÜFKÖRPER NACH ERMÜDUNGSVORBELASTUNG VOR DER HFH-BEHANDLUNG, AUSWERTUNG MIT FREIER NEIGUNG UND SCHWINGSPIELEN NACH HFH-BEHANDLUNG, $R = 0,1$	194
ABBILDUNG 5-51: HFH-BEHANDELTE LÄNGSSTEIFEN MIT VERSAGEN AUSGEHEND VON ANRISS AUS VORSCHÄDIGUNG (LINKS) SOWIE VON DER NAHTWURZEL (RECHTS) [90]	195
ABBILDUNG 5-52: NENNSPANNUNGSWÖHLERLINIEN FÜR STUMPFSTÖßE AUS S690QL: VERGLEICH HFH-BEHANDELTER UND ANSCHLIEßEND REINIGUNGSGESTRAHLTER MIT AUSSCHLIEßLICH HFH- BEHANDELTEN REFERENZPRÜFKÖRPERN, $R = 0,1$ [90].....	196
ABBILDUNG 5-53: VERGLEICH DER WÖHLERLINIENNEIGUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT DES DETAILS UND DES NACHBEHANDLUNGSZUSTANDS	197
ABBILDUNG 5-54: VERSUCHSERGEBNISSE UND AUSWERTUNG VON ERMÜDUNGSVERSUCHEN AUS [90] ZUR ABSCHÄTZUNG DER NEIGUNG IM DAUERFESTIGKEITSBEREICH	198
ABBILDUNG 6-1: SCHEMA ZUR VERMESSUNG DER PRÜFKÖRPERGEOMETRIE	201
ABBILDUNG 6-2: VERMESSUNG DER LOKALEN NAHTGEOMETRIE	202
ABBILDUNG 6-3: MESSVORRICHTUNG ZUR MESSUNG DES VERZUGS	203
ABBILDUNG 6-4: GEMESSENER WINKELVERZUG DER PRÜFKÖRPER BEIDSEITS DER QUERSTEIFE.....	203
ABBILDUNG 6-5: MAKROSCHLIFF DES PRÜFKÖRPERS 3.16: ASYMMETRISCHER EINBRAND	204
ABBILDUNG 6-6: APPLIKATION DER DMS AUF QUERSTEIFE	205
ABBILDUNG 6-7: DMS-MESSUNG AN QUERSTEIFE AM KIT	206
ABBILDUNG 6-8: STRUKTURSPANNUNGSKONZEPT: LINEARE EXTRAPOLATION DER SPANNUNG ZUM SCHWEIßNAHTÜBERGANG	207
ABBILDUNG 6-9: 2D MODELL ZUR BESTIMMUNG DER STRUKTURSPANNUNGEN	208

ABBILDUNG 6-10: FIKTIVE AUSRUNDUNG DER SCHWEIßNAHTÜBERGÄNGE UND WURZELN NACH [51]	210
ABBILDUNG 6-11: KERBSPANNUNGSBERECHNUNG: 2D FE-MODELL DER QUERSTEIFE UNTER AUSNUTZUNG DER SYMMETRIE	211
ABBILDUNG 6-12: KERBSPANNUNGSBERECHNUNG: VERNETZUNG IM AUSRUNDUNGSBEREICH	211
ABBILDUNG 6-13: EINFLUSS BLECHDICKE t UND ABSTAND DER SCHWEIßNAHTFUßPUNKTE AUF KERBFAKTOR K_T	212
ABBILDUNG 6-14: KERBSPANNUNGSBERECHNUNG: KORREKTURFAKTOR K_Q FÜR ERMÜDUNGSFESTIGKEIT	213
ABBILDUNG 6-15: 2D-MODELL MIT EINEM EXEMPLARISCHEN VERZUG VON $1,6^\circ$	214
ABBILDUNG 6-16: EINFLUSS DES VERZUGS AUF SCF UND KERBFAKTOR K_T	214
ABBILDUNG 7-1: AUSZUG AUS DIN EN 1993-1-9 [16] KONSTRUKTIONSDetail UNBELASTETE QUERSTEIFE	221
ABBILDUNG 7-2: DARSTELLUNG DER SCHNITTPUNKTE DER VERBESSERTEN MIT DEN URSPRÜNGLICHEN KERBFALLGERADEN FÜR DIE UNBELASTETE QUERSTEIFE [3]	222
ABBILDUNG 7-3: AUSZUG AUS DIN EN 1993-1-9 [16] KONSTRUKTIONSDetail QUERBEANSPRUCHTER STUMPFSTOß	223
ABBILDUNG 7-4: DARSTELLUNG DER SCHNITTPUNKTE DER VERBESSERTEN MIT DEN URSPRÜNGLICHEN KERBFALLGERADEN FÜR DEN QUERBELASTETEN STUMPFSTOß [3]	224
ABBILDUNG 7-5: AUSZUG AUS DIN EN 1993-1-9 [16] KONSTRUKTIONSDetail UNBELASTETE LÄNGSSTEIFE	225
ABBILDUNG 7-6: DARSTELLUNG DER SCHNITTPUNKTE DER VERBESSERTEN MIT DEN URSPRÜNGLICHEN KERBFALLGERADEN FÜR DIE UNBELASTETE LÄNGSSTEIFE [3]	226
ABBILDUNG 8-1: ÜBERSICHT DER VERBESSERTEN ERMÜDUNGSFESTIGKEIT IN TABELLIERTER FORM	233

List of figures

FIGURE 1-1: CONCEPT FOR HFMI IN CONTEXT OF RULES BY THE BUILDING AUTHORITY	32
FIGURE 1-2: IMPROVEMENT FACTORS ACCORDING TO DIFFERENT FATIGUE DESIGN CONCEPTS FOR HIGH FREQUENCY HAMMER PEENED JOINTS DEPENDING ON THE STRESS RATIO R FROM [40].....	34
FIGURE 1-3: OPERATING DIAGRAM	35
FIGURE 2-1: HFMI-APPLICABLE CONSTRUCTION DETAILS	40
FIGURE 2-2: NON-HFMI-APPLICABLE CONSTRUCTION DETAILS	41
FIGURE 2-3: RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS PERPENDICULAR TO WELD IN DEPTHS AT S355 AND S690 FROM [30]	42
FIGURE 2-4: COMPARISON OF TRANSVERSE RESIDUAL STRESSES AT THE SURFACE OF S690 IN AS-WELDED, UIT, HiFIT AND HFMI AND [99]	43
FIGURE 2-5: HiFIT DEVICE (PICTURE SOURCE: HiFIT VERTRIEBS GMBH) AND MEASUREMENT OF DEPTH OF INDENTATION WITH GAUGE ACC. TO [68], (PICTURE SOURCE: HiFIT VERTRIEBS GMBH)	45
FIGURE 2-6: UIT-DEVICE [30] AND CORRESPONDING TREATMENT TRACK FROM [99]	46
FIGURE 2-7: HiFIT-DEVICE [50] AND CORRESPONDING TREATMENT TRACK ON S355	46
FIGURE 2-8: PIT-DEVICE [79] AND CORRESPONDING TREATMENT TRACK ON S355	46
FIGURE 2-9: COMPARISON OF MEAN VALUES OF RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS AT SURFACE OF S235 FROM [61]	48
FIGURE 2-10: COMPARISON OF MEAN VALUES OF RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS IN DEPTH OF S235 FROM [61]	48
FIGURE 3-1: SPECIFICATION OF THE SIZE EFFECT, ILLUSTRATION FROM [3].....	55
FIGURE 3-2: SCHEMATIC VIEW OF SIZE EFFECT DUE TO STRESS GRADIENT EFFECTS NACH [78]	56
FIGURE 3-3: ALLOCATION OF THE DIFFERENT VARIATIONS TO TYPES OF SIZE EFFECTS BY THE EXAMPLE OF UNLOADED TRANSVERSE STIFFENER [3].....	56
FIGURE 3-4: EVALUATION OF [55] REGARDING TO FATIGUE TESTS FOR DIFFERENT TRANSVERSE WELDED JOINTS FROM GURNEY [42]	57
FIGURE 3-5: EXTRACT OF THE FATIGUE DETAIL CATEGORY OF CROSS-LOADED BUTT JOINT FROM DIN EN 1993-1-9 [16] TAB. 8.3	58
FIGURE 3-6: EXTRACT OF THE FATIGUE DETAIL CATEGORY UNLOADED TRANSVERSE STIFFENER DEPENDING ON THE TRANSITION GAP OF THE WELD FROM DIN EN 1993-1-9 [16].....	59
FIGURE 3-7: EXTRACT OF THE FATIGUE DETAIL CATEGORY UNLOADED LONGITUDINAL STIFFENERS DEPENDING ON THE LONGITUDE OF THE STIFFENER FROM DIN EN 1993-1-9 [16]	59
FIGURE 3-8: TACKING OF STIFFENERS AND MOUNTING OF RUN-ON AND RUN-OFF PLATES	61
FIGURE 3-9: SIMULTANEOUS WELDING OF FILLET WELDS ON BOTH SIDES OF THE STIFFENER WITH WELDYCAR	62
FIGURE 3-10: DIMENSIONS OF SMALL SCALE SPECIMENS	62
FIGURE 3-11: SMALL SCALE SPECIMEN, TRANSVERSE ATTACHMENT, S355J2+N, SIDE VIEW (UPPER PICTURE), TOP VIEW (LOWER PICTURE)	63
FIGURE 3-12: SMALL SCALE SPECIMENS: HiFIT-TREATMENT (LEFT SIDE) AND PIT-TREATMENT (RIGHT SIDE)	64
FIGURE 3-13: HFMI-TREATED SMALL SCALE SPECIMENS WITH LATERAL BURR: HiFIT (LEFT SIDE) PIT (RIGHT SIDE)	64

FIGURE 3-14: FATIGUE TEST OF TRANSVERSE ATTACHMENT ON HIGH-FREQUENCY TESTING MACHINE AT KIT	65
FIGURE 3-15: TRANSVERSE ATTACHMENT WITH FATIGUE CRACK AT WELD TOE (AS WELDED, LEFT SIDE) AND HFMI-TREATED TRANSVERSE ATTACHMENT WITH FATIGUE CRACK IN BASIC MATERIAL (RIGHT SIDE).....	66
FIGURE 3-16: HIFIT-TREATED TRANSVERSE ATTACHMENT WITH FATIGUE CRACK AT WELD TOE (LEFT SIDE) AND PIT-TREATED TRANSVERSE ATTACHMENT WITH FATIGUE CRACK AT WELD TOE (RIGHT SIDE).....	66
FIGURE 3-17: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF TRANSVERSE ATTACHMENT: AW CONDITION (DAST_2_E-AW) AND HFMI-TREATED CONDITION (DAST_2_E_HFH), R = 0,1	67
FIGURE 3-18: DETAILING OF WELDED TRANSVERSE ATTACHMENTS IN GIRDER SECTIONS [3].....	69
FIGURE 3-19: PRACTICAL TEST WITH PIT-DEVICE AT WELDED GIRDER WITH TRANSVERSE ATTACHMENT AND CIRCULAR CUTTING R = 30 MM [3].....	70
FIGURE 3-20: TACK WELDING AND WELDING OF TRANSVERSE STIFFENER IN FLAT POSITION [3]	70
FIGURE 3-21: POST-WELD TREATMENT WITH HIFIT REALIZED BY <i>DYNATEC GMBH</i> [3].....	71
FIGURE 3-22: POST-WELD REATMENT WITH PIT REALIZED BY <i>PITEC GMBH</i> [3].....	71
FIGURE 3-23: ARRANGEMENT OF STRAIN GAUGES ON TENSIONED FLANGE CLOSE TO TRANSVERSE STIFFENER [3].....	74
FIGURE 3-24: TEST SETUP OF BEAM TEST SERIES T2 [3]	75
FIGURE 3-25: PINNED SUPPORTING POINT AND LOAD INTRODUCTION OF BEAM TEST SERIES T2 [3]	76
FIGURE 3-26: ADAPTION ON NOMINAL STRESS DEFINITION FOR GIRDER SECTION BY HELMS [48] TO ROLLED HEA260 PROFILE WITH WELDED TRANSVERSE ATTACHMENT [3].....	77
FIGURE 3-27: FAILURE OF GIRDER SERIES T2 AT WELD TOE OF THE TRANSVERSE STIFFENER [3].....	79
FIGURE 3-28: TOP VIEW ON CRACK GROWTH AT WELD TOE OF TRANSVERSE STIFFENER (T2.17-S3R+) [3]	79
FIGURE 3-29: FRACTURE PATTERN TEST GIRDER T1 AW [3].....	80
FIGURE 3-30: FRACTURE PATTERN TEST GIRDER T1 AW - DETAIL [3]	80
FIGURE 3-31: FRACTURE PATTERN TEST GIRDER 2.18 - STIFFENER NO. 5 [3].....	81
FIGURE 3-32: FRACTURE PATTERN TEST GIRDER 2.18 - STIFFENER NO. 5 - DETAIL [3].....	81
FIGURE 3-33: FRACTURE PATTERN WITH FATIGUE CRACK AND WELD START POSITION [3]	82
FIGURE 3-34: TEST RESULTS OF GIRDER TESTS WITH TENSION-TENSION-STRESSES R = 0.1 [3].....	83
FIGURE 3-35: EVALUATION OF RESULTS FROM GIRDER-TESTS WITH TENSION-TENSION STRESSES R = 0.1 WITH FIXED SLOPE (M = 5) [3].....	85
FIGURE 3-36: EVALUATION OF RESULTS FROM GIRDER-TESTS WITH TENSION-TENSION STRESSES R = 0.1 WITH VARIABEL SLOPE (M = 4.4) [3].....	85
FIGURE 3-37: COMPARISON OF TEST RESULTS FROM GIRDER TEST SERIES T2 AND SMALL SCALE SERIES E2 [3]	86
FIGURE 3-38: OVERVIEW OF MEAN STRESSES	87
FIGURE 3-39: EXTENSION OF VISUALIZATION OF FIGURE 3-40 OF COMPONENTS WITHOUT RESIDUAL STRESSES FOR ALTERNATE LOADING (01) , PULSATING TENSIONAL LOADING (02) ACCORDING TO THEORY OF GURNEY [41].....	88
FIGURE 3-40: SUPERPOSITION OF LOADING- AND RESIDUAL STRESSES FOR ALTERNATE LOADED (A) AND PULSATING COMPRESSIVE (B) LOADED WELDED COMPONENTS FROM [63] ACCORDING TO THEORY OF GURNEY [41].....	88
FIGURE 3-41: EXTRACT FROM DIN EN 1993-1-9 [16] FOR DETERMINING THE MODIFIED STRESS RANGE ON NOT WELDED AND STRESS-RELIEF ANNEALED CONSTRUCTIONS	89

FIGURE 3-42: EXTENSION OF VISUALIZATION ACCORDING TO [3] OF FIGURE 3-40 OF WELDED COMPONENTS UNDER COMPRESSIVE RESIDUAL STRESS FOR ALTERNATE LOADING (C) , PULSATING TENSIONAL LOADING (D) AND PULSATING COMPRESSIVE LOADING (E) ACCORDING TO THEORY OF GURNEY [41]	90
FIGURE 3-43: HFMI-TREATED TRANSVERSE ATTACHMENT WITH FATIGUE CRACK IN BASIC MATERIAL, $R = -1$	91
FIGURE 3-44: DIMENSIONS OF WAISTED SMALL SCALE SPECIMENS.....	92
FIGURE 3-45: SMALL SCALE SPECIMENS IN WAISTED AND ORIGINAL CONDITION (LEFT SIDE), FATIGUE CRACK AT HFMI-TREATED WELD TOE OF A WAISTED SPECIMEN (RIGHT SIDE)	92
FIGURE 3-46: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF TRANSVERSE ATTACHMENT: AW CONDITION (DAST_1_AW) AND HFMI-TREATED CONDITION (DAST_1_HFH), $R = -1$	93
FIGURE 3-47: POST-TREATMENT REALIZED BY <i>PITEC GMBH</i> AND <i>DYNATEC GMBH</i>	94
FIGURE 3-48: SCHEME - TOP VIEW ON TEST SETUP [3]	95
FIGURE 3-49: SCHEME - ELEVATION ON TEST SETUP [3]	95
FIGURE 3-50: GENERATED BENDING LINE BY ACTIVATING EXTERNAL VIBRATORS [3].....	96
FIGURE 3-51: EXTERNAL VIBRATOR FROM <i>KNAUER ENGINEERING INDUSTRIEANLAGEN GMBH & CO. KG</i> [3]	96
FIGURE 3-52: EXTERNAL VIBRATOR FROM <i>KNAUER ENGINEERING INDUSTRIEANLAGEN GMBH & CO. KG</i> [3]	97
FIGURE 3-53: MEASUREMENT WHILE TEST EXECUTION [3]	98
FIGURE 3-54: TEST SETUP [3].....	98
FIGURE 3-55: MEASURING UNIT WITH TEST SETUP [3].....	99
FIGURE 3-56: CRACK INITIATION THROUGH INSUFFICIENT POST-TREATMENT AT THE WEB [3]	100
FIGURE 3-57: TYPICAL CRACK INITIATION AT THE WELDING ON THE BOTTOM CHORD [3]	100
FIGURE 3-58: TEST RESULTS OF THE ALTERNATING LOAD TEST SEPARATED BY TREATMENT STATE [3]	102
FIGURE 3-59: EVALUATION OF RESULTS FROM GIRDER-TESTS WITH ALTERNATING STRESSES $R = -1.0$ WITH FREE SLOPE ($M = 2.2$) [3].....	103
FIGURE 3-60: EVALUATION OF RESULTS FROM GIRDER-TESTS WITH ALTERNATING STRESSES $R = -1.0$ WITH FIXED SLOPE ($M = 5$) [3]	104
FIGURE 3-61: COMPARISON OF GIRDER-SERIES T1 AND T2 WITH MODIFICATION OF STRESS RANGE OF SERIES T1 [3]	105
FIGURE 3-62: COMPARISON OF TEST RESULTS FROM GIRDER TEST SERIE T1 AND SMALL SCALE SERIES E1 [3]	106
FIGURE 3-63: LOAD SEQUENCE M1 – TENSILE OVERLOADS PRIOR TO FATIGUE TESTING.....	107
FIGURE 3-64: LOAD SEQUENCE M1 – FORCE-DISPLACEMENT RECORDING OF TESTING RIG	108
FIGURE 3-65: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF TRANSVERSE ATTACHMENT, LOAD SEQUENCE M1: AW CONDITION (DAST_3_M1_AW) AND HFMI-TREATED CONDITION (DAST_3_M1_HFH), $R = 0.1$	109
FIGURE 3-66: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF TRANSVERSE ATTACHMENT: HFMI-TREATED SPECIMENS (REFERENCE) (DAST_2_E_HFH) AND HFMI-TREATED SPECIMENS WITH LOAD SEQUENCE M1 (DAST_3_M1_HFH), $R = 0.1$	110
FIGURE 3-67: LOAD SEQUENCE M2 – COMPRESSIVE OVERLOADS PRIOR TO FATIGUE TESTING	111
FIGURE 3-68: LOAD SEQUENCE M2 – FORCE-DISPLACEMENT RECORDING OF TESTING RIG	111

FIGURE 3-69: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF TRANSVERSE ATTACHMENT, LOAD SEQUENCE M2: AW CONDITION (DAST_3_M2_AW) AND HFMI-TREATED CONDITION (DAST_3_M2_HFH), R = 0.1	112
FIGURE 3-70: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF TRANSVERSE ATTACHMENT: HFMI-TREATED SPECIMENS (REFERENCE) (DAST_2_E_HFH) AND HFMI-TREATED SPECIMENS WITH LOAD SEQUENCE M2 (DAST_3_M2_HFH), R = 0.1	113
FIGURE 3-71: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF TRANSVERSE ATTACHMENT IN AW CONDITION: APPROACH FOR DETERMINATION OF FATIGUE PRELOAD.....	114
FIGURE 3-72: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF TRANSVERSE ATTACHMENT: REFERENCE SPECIMEN IN AW CONDITION (DAST_2_E_AW) AND HFMI-TREATED SPECIMENS AFTER FATIGUE PRELOAD (DAST_5_E_V_HFH), R = 0.1.....	116
FIGURE 3-73: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF TRANSVERSE ATTACHMENT OF REFERENCE SPECIMENS IN HFMI-TREATED CONDITION (DAST_2_E_HFH) AND RESULTS OF HFMI-TREATED SPECIMENS WITH VARIED TREATMENT INTENSITY (DAST_2_E_HFH_I_HOCH-NIEDRIG), R = 0.1	118
FIGURE 3-74: INFLUENCE OF DIFFERING YIELD STRENGTH FOR TRANSVERSE LOADED BUTT WELD FROM [99]	120
FIGURE 4-1: TEST SPECIMEN UNDER BENDING LOAD [5].....	124
FIGURE 4-2: OVERVIEW OF CRITERIA AND PARAMETER OF THE DATA BASE	126
FIGURE 4-3: TYPES OF PRELOADS [3]	129
FIGURE 4-4: DESCRIPTION OF THE COMMENTS	130
FIGURE 4-5: INPUT-BLANK	131
FIGURE 4-6: PRESENTATION OF THE NUMBER OF DATA SETS RELATING TO CONSTRUCTION DETAIL..	132
FIGURE 4-7: PRESENTATION OF THE NUMBER OF DATA SETS RELATING TO STEEL GRADE.....	133
FIGURE 4-8: PRESENTATION OF THE NUMBER OF DATA SETS RELATING TO THE STRESS RATIO R.....	134
FIGURE 4-9: COMPARISON OF NOMINAL AND REAL YIELD STRENGTH OF APPLIED MATERIALS OF USED LITERATURE	135
FIGURE 5-1: LOCAL DESIGN APPROACH BY WEICH [99]	140
FIGURE 5-2: SCOPE AND IMPROVEMENT STEPS THROUGH HFMI ACCORDING TO IIW-RECOMMENDATION [68]	141
FIGURE 5-3: STEEL GRADE DEPENDENCE ACCORDING TO IIW-RECOMMENDATION [68].....	142
FIGURE 5-4: EFFECT OF THE MEAN STRESS ACCORDING TO IIW-RECOMMENDATIONS [68]	142
FIGURE 5-5: MINIMUM OF LOAD CYCLES ACCORDING TO IIW-RECOMMENDATIONS [68]	142
FIGURE 5-6: MEAN STRESS EFFECT ON UNTREATED TRANSVERSE STIFFENERS S355	145
FIGURE 5-7: MEAN STRESS EFFECT ON HFH-TREATED TRANSVERSE STIFFENERS S355	146
FIGURE 5-8: MEAN STRESS EFFECT ON UNTREATED TRANSVERSE STIFFENERS S690	146
FIGURE 5-9: MEAN STRESS EFFECT ON HFH-TREATED TRANSVERSE STIFFENERS S690	147
FIGURE 5-10: MEAN STRESS EFFECT OF THE TRANSVERSE STIFFENER (M = VAR) [3].....	149
FIGURE 5-11: EFFECT OF THE YIELD STRENGTH ON UNTREATED TRANSVERSE STIFFENER WITH STRESS RATIO R = 0.1	151
FIGURE 5-12: EFFECT OF THE YIELD STRENGTH ON HFMI-TREATED TRANSVERSE STIFFENERS WITH STRESS RATIO R = 0.1	151
FIGURE 5-13: EFFECT OF THE YIELD STRENGTH ON UNTREATED AND HFMI-TREATED TRANSVERSE STIFFENERS WITH STRESS RATIO R = 0.1 AND FREE SLOPE OF THE WÖHLER CURVE M_{FREE} [3]	152
FIGURE 5-14: EFFECT OF THE YIELD STRENGTH ON UNTREATED AND HFMI-TREATED TRANSVERSE STIFFENERS WITH STRESS RATIO R = -1.0 AND FREE SLOPE OF THE WÖHLER CURVE M_{FREE} [3] ...	153

FIGURE 5-15: YIELD STRENGTH- AND MEAN STRESS INFLUENCE IN COMPARISON TO PROPOSED DETAIL CATEGORIES OF IIW-RECOMMENDATIONS FOR HFMI-TREATED TRANSVERSE STIFFENER ($M_{HFMI} = \text{FIX}$) [3].....154

FIGURE 5-16: CATEGORIZATION OF THE GIRDER TEST RESULTS IN UNTREATED CONDITION [3].....155

FIGURE 5-17: CATEGORIZATION OF THE GIRDER TEST RESULTS IN HFMI-TREATED CONDITION [3] ...156

FIGURE 5-18: CATEGORIZATION OF THE TEST RESULTS IN HFMI-TREATED CONDITION UNDER VARIATION OF THE PLATE THICKNESS S355157

FIGURE 5-19: CATEGORIZATION OF THE TEST RESULTS IN HFMI-TREATED CONDITION UNDER VARIATION OF THE PLATE THICKNESS FOR S460158

FIGURE 5-20: CATEGORIZATION OF THE TEST RESULTS IN HFMI-TREATED CONDITION UNDER VARIATION OF THE PLATE THICKNESS FOR S690158

FIGURE 5-21: EFFECT OF THE PLATE THICKNESS ON HFMI-TREATED TRANSVERSE STIFFENERS S355, S460 AND S690 WITH EVALUATION WITH FIXED SLOPE [3].....160

FIGURE 5-22: EFFECT OF THE MEAN STRESS ON UNTREATED BUTT JOINTS S355162

FIGURE 5-23: EFFECT OF THE MEAN STRESS ON HFMI-TREATED BUTT JOINTS S355162

FIGURE 5-24: EFFECTS OF MEAN STRESS ON UNTREATED BUTT JOINTS S690.....163

FIGURE 5-25: EFFECTS OF MEAN STRESS ON HFMI-TREATED BUTT JOINTS S690164

FIGURE 5-26: EFFECT OF MEAN STRESS OF BUTT JOINTS ($M = \text{FREE}$) [3]166

FIGURE 5-27: YIELD STRENGTH EFFECT FOR UNTREATED BUTT WELD WITH STRESS RATIO $R = 0.1$...167

FIGURE 5-28: YIELD STRENGTH EFFECT FOR HFMI-TREATED BUTT WELD WITH STRESS RATIO $R = 0.1$ 168

FIGURE 5-29: YIELD STRENGTH EFFECT FOR UNTREATED AND HFMI-TREATED BUTT WELD WITH STRESS RATIO $R = 0.1$ AND FREE SLOPE FOR WÖHLER CURVE $M_{Aw} = M_{HFMI} = \text{FREE}$ [3].....169

FIGURE 5-30: YIELD STRENGTH EFFECT FOR UNTREATED AND HFMI-TREATED BUTT WELD WITH STRESS RATIO $R = -1.0$ AND FREE SLOPE FOR WÖHLER CURVE $M_{Aw} = M_{HFMI} = \text{FREE}$ [3]169

FIGURE 5-31: YIELDS STRENGTH- AND MEAN STRESS INFLUENCE IN COMPARISON TO PROPOSED DETAIL CATEGORIES OF IIW-RECOMMENDATIONS FOR HFMI-TREATED BUTT WELD ($M_{HFMI} = \text{FIX}$) [3]..170

FIGURE 5-32: PLATE THICKNESS EFFECT OF AS-WELDED BUTT WELD OF S355171

FIGURE 5-33: PLATE THICKNESS EFFECT OF HFMI-TREATED BUTT WELD OF S355172

FIGURE 5-34: PLATE THICKNESS EFFECT ON UNTREATED BUTT JOINT OF S690173

FIGURE 5-35: PLATE THICKNESS EFFECT ON HFMI-TREATED BUTT JOINT OF S690.....174

FIGURE 5-36: PLATE THICKNESS EFFECT ON HFMI-TREATED BUTT JOINT OF S355 AND S690 WITH EVALUATION WITH FIXED SLOPE [3].....176

FIGURE 5-37: MEAN STRESS EFFECT ON HFMI- AND UNTREATED LONGITUDINAL STIFFENER OF S355178

FIGURE 5-38: MEAN STRESS EFFECT ON HFMI- AND UNTREATED LONGITUDINAL STIFFENER OF S690178

FIGURE 5-39: MEAN STRESS EFFECT OF THE LONGITUDINAL STIFFENER ($M = \text{VAR}$) [3].....180

FIGURE 5-40: EFFECT OF YIELD STRENGTH ON UNTREATED LONGITUDINAL STIFFENER WITH STRESS RATIO $R = 0,1$ 181

FIGURE 5-41: EFFECT OF THE YIELD STRENGTH ON HFMI-TREATED LONGITUDINAL STIFFENER WITH STRESS RATIO $R = 0,1$ 181

FIGURE 5-42: EFFECT OF THE YIELD STRENGTH ON UNTREATED AND HFMI-TREATED LONGITUDINAL STIFFENER WITH STRESS RATIO $R = 0.1$ AND FREE SLOPE OF THE WÖHLER CURVE $M_{Aw} = M_{HFMI} = \text{FREE}$ [3]182

FIGURE 5-43: EFFECT OF THE YIELD STRENGTH ON UNTREATED AND HFMI-TREATED LONGITUDINAL STIFFENER WITH STRESS RATIO $R = -1.0$ AND FREE SLOPE OF THE WÖHLER CURVE $M_{AW} = \text{UND } M_{HFMI} = \text{FREE}$ [3].....	182
FIGURE 5-44: COMPARISON OF YIELD STRENGTH- AND MEAN STRESS EFFECTS FOR HFMI-TREATED LONGITUDINAL STIFFENER WITH FIXED SLOPE OF WÖHLER CURVE $M_{HFMI} = \text{FREE}$ [3]	183
FIGURE 5-45: PLATE THICKNESS EFFECT OF HFMI-TREATED LONGITUDINAL STIFFENERS OF S355...	184
FIGURE 5-46: PLATE THICKNESS EFFECT OF HFMI-TREATED LONGITUDINAL STIFFENERS OF S690...	184
FIGURE 5-47: PLATE THICKNESS EFFECT OF LONGITUDINAL STIFFENER OF S355 AND S690 UNDER EVALUATION WITH FIXED SLOPE [3].....	186
FIGURE 5-48: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF BUTT WELDED JOINTS, STEEL GRADE S355J2: COMPARISON OF HFMI-TREATED AND QUASI-STATIC PRELOADED JOINTS WITH EXCLUSIVELY HFMI-TREATED JOINTS, $R = 0.1$ [90]	188
FIGURE 5-49: IMPROVEMENT OF HFMI-TREATED SPECIMENS AFTER APPLYING AN OVERLOAD BEFORE FATIGUE TESTING, EVALUATION BASED ON A FREE SLOPE AND ACTUAL YIELD STRENGTH, $R = 0.1$	191
FIGURE 5-50: IMPROVEMENT OF HFMI-TREATED SPECIMENS AFTER APPLYING A FATIGUE PRELOAD PRIOR TO HFMI-TREATMENT, EVALUATION BASED ON A FREE SLOPE WITH LOAD CYCLES AFTER HFMI-TREATMENT, $R = 0.1$	194
FIGURE 5-51: HFMI-TREATED LONGITUDINAL STIFFENERS WITH FATIGUE FAILURE INITIATING AT A PRE-EXISTING CRACK FROM PRELOADING (LEFT FIGURE) AS WELL AS FATIGUE FAILURE FROM WELD ROOT (RIGHT FIGURE) [90].....	195
FIGURE 5-52: S-N CURVE FOR NOMINAL STRESS OF BUTT WELDED JOINTS, STEEL GRADE S690QL: COMPARISON OF HFMI-TREATED AND BLAST CLEANED JOINTS WITH EXCLUSIVELY HFMI-TREATED JOINTS, $R = 0.1$ [90]	196
FIGURE 5-53: COMPARISON OF SLOPES FOR SN CURVES DEPENDING ON DETAIL AND STATE OF POST-WELD-TREATMENT.....	197
FIGURE 5-54: TEST RESULTS AND EVALUATION OF FATIGUE TESTS FROM [90] IN ORDER TO ESTIMATE THE SLOPE FOR HIGH CYCLE FATIGUE.....	198
FIGURE 6-1: PROCEDURE FOR MEASUREMENT OF SPECIMEN DIMENSIONS	201
FIGURE 6-2: MEASUREMENT OF LOCAL WELD TOE GEOMETRY	202
FIGURE 6-3: MEASURING DEVICE FOR MEASUREMENT OF ANGULAR DISTORTION	203
FIGURE 6-4: MEASURED ANGULAR DISTORTION ON EACH SIDE OF TRANSVERSE ATTACHMENT	203
FIGURE 6-5: MACRO SECTION OF SPECIMEN 3.16: ASYMMETRIC WELD PENETRATION.....	204
FIGURE 6-6: APPLICATION OF STRAIN GAUGES ON TRANSVERSE ATTACHMENT	205
FIGURE 6-7: STRAIN GAUGE MEASUREMENT ON TRANSVERSE STIFFENER AT KIT.....	206
FIGURE 6-8: STRUCTURAL HOT SPOT STRESS: LINEAR EXTRAPOLATION OF STRESS	207
FIGURE 6-9: 2D FE-MODEL FOR DETERMINATION OF STRUCTURAL STRESS	208
FIGURE 6-10: FICTITIOUS ROUNDING OF WELD TOES AND ROOTS ACCORDING TO [51].....	210
FIGURE 6-11: CALCULATION OF NOTCH STRESS: 2D FE-MODEL OF TRANSVERSE ATTACHMENT USING SYMMETRY CONDITIONS	211
FIGURE 6-12: CALCULATION OF NOTCH STRESS: MESH REFINEMENT AT FICTITIOUS ROUNDED WELD TOE.....	211
FIGURE 6-13: EFFECT OF PLATE THICKNESS AND DISTANCE OF WELD TOES ON NOTCH FACTOR K_T	212
FIGURE 6-14: CALCULATION OF NOTCH STRESS: CORRECTION FACTOR K_Q FOR FATIGUE STRENGTH ..	213
FIGURE 6-15: EXAMPLE OF 2D FE-MODEL WITH ANGULAR MISALIGNMENT OF $1,6^\circ$	214
FIGURE 6-16: EFFECT OF ANGULAR MISALIGNMENT ON SCF AND NOTCH FACTOR K_T	214

FIGURE 7-1: EXCERPT OF DIN EN 1993-1-9 [16] CONSTRUCTION DETAIL OF UNLOADED TRANSVERSE STIFFENER221

FIGURE 7-2: VISUALIZATION OF INTERSECTIONS OF IMPROVED WITH ORIGINAL DETAIL CATEGORY LINES FOR UNLOADED TRANSVERSE STIFFENER [3].....222

FIGURE 7-3: EXCERPT OF DIN EN 1993-1-9 [16] CONSTRUCTION DETAIL OF TRANSVERSE LOADED BUTT WELD223

FIGURE 7-4: VISUALIZATION OF INTERSECTIONS OF IMPROVED WITH ORIGINAL DETAIL CATEGORY LINES FOR BUTT WELD [3].....224

FIGURE 7-5: EXCERPT OF DIN EN 1993-1-9 [16] CONSTRUCTION DETAIL OF UNLOADED LONGITUDINAL STIFFENER225

FIGURE 7-6: VISUALIZATION OF INTERSECTIONS OF IMPROVED WITH ORIGINAL DETAIL CATEGORY LINES FOR UNLOADED LONGITUDINAL ATTACHMENT [3].....226

FIGURE 8-1: OVERVIEW OF IMPROVED FATIGUE RESISTANCE IN TABULATED FORM.....233

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ÜBLICHE EINSTELLUNGEN FÜR UIT-ANWENDUNG AUF BAUSTAHL	44
TABELLE 2: EINSTELLMÖGLICHKEITEN DES HiFIT-GERÄTS	45
TABELLE 3: ÜBLICHE EINSTELLUNGEN FÜR PIT-ANWENDUNG AUF BAUSTAHL	47
TABELLE 4: VERSUCHSPROGRAMM	53
TABELLE 5: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON WARMGEWALZTEN ERZEUGNISSEN AUS BAUSTÄHLEN NACH EN 10025-2 [22] UND EN10025-1 [21]	61
TABELLE 6: HFH-BEHANDLUNG: GERÄTEEINSTELLUNGEN UND NACHBEHANDLUNGSPARAMETER ...	63
TABELLE 7: MATERIALEIGENSCHAFTEN ENTSPRECHEND DEN ABNAHMEPRÜFZEUGNIS 3.1 IN ANHANG B	69
TABELLE 8: ABMESSUNGEN DER TRÄGERVERSUCHE T1 (R = 0,1) [3]	72
TABELLE 9: GRENZABMAßE DES QUERSCHNITTS FÜR BREITFLANSCHTRÄGER NACH DIN EN 10034 [23]	73
TABELLE 10: VERGLEICH DER NENNSPANNUNGSSCHWINGBREITE $\Delta\sigma_{\text{NOM}}$ DER TRÄGERVERSUCHE T2 (R = 0,1) [3]	78
TABELLE 11: VERSUCHSERGEBNISSE TRÄGERVERSUCHE T1 (R = -1,0) UND MODIFIZIERTE NENNSPANNUNGSSCHWINGBREITE NACH DIN EN 1993-1-9 [16] AUS [3]	101
TABELLE 12: RECHNERISCHE BRUCHLASTSPIELZAHLEN FÜR QUERSTEIFEN IM ZUSTAND AW ABHÄNGIG VON DER SPANNUNGSSCHWINGBREITE	114
TABELLE 13: ÜBERSICHT DER ENTHALTENEN FORSCHUNGSPROJEKTE UND DEREN VERSUCHSDATEN	122
TABELLE 14: ÜBERSICHT DER BISHER UNTERSUCHTEN GESCHWEIßTEN KONSTRUKTIONSDetails ...	127
TABELLE 15: ANZAHL DER DATENBANKSÄTZE NACH KONSTRUKTIONSDetail	132
TABELLE 16: ANZAHL DER DATENBANKSÄTZE NACH STAHLGÜTE.....	133
TABELLE 17: ANZAHL DER DATENBANKSÄTZE NACH NACHBEHANDLUNGSVERFAHREN	133
TABELLE 18: ANZAHL DER DATENBANKSÄTZE NACH VERSUCHSTYP	133
TABELLE 19: ANZAHL DER DATENBANKSÄTZE NACH SPANNUNGSVERHÄLTNIS R	134
TABELLE 20: ÜBERSICHT NOMINELLER UND REELLER STRECKGRENZEN VERWENDETER MATERIALIEN AUS GENUTZTEN LITERATURSTELLEN.....	135
TABELLE 21: ERMITTLUNG DER VERBESSERUNGSFAKTOREN K_F , K_L , K_R NACH DÜRR [30]	138
TABELLE 22: BEMESSUNGSVORSCHLAG AUF NENNSPANNUNGSBASIS NACH REFRESH [90]	139
TABELLE 23: ÜBERSICHT DER DATENGRUNDLAGE ZUM MITTELSPANNUNGS- UND STRECKGRENZENEINFLUSS DER QUERSTEIFE	144
TABELLE 24: AUSWERTUNG DES MITTELSPANNUNGS – UND STRECKGRENZENEINFLUSSES DER QUERSTEIFE	148
TABELLE 25: ÜBERSICHT ZUR AUSWERTUNG DES BLECHDICKENEINFLUSSES DER QUERSTEIFE	159
TABELLE 26: ÜBERSICHT ÜBER DATENGRUNDLAGE ZUM MITTELSPANNUNGSEINFLUSS DES STUMPFSTOBES	161
TABELLE 27: AUSWERTUNG DES MITTELSPANNUNGS- UND STRECKGRENZENEINFLUSSES DES STUMPFSTOBES	165
TABELLE 28: ÜBERSICHT ZUR AUSWERTUNG DES BLECHDICKENEINFLUSSES DES STUMPFSTOBES ...	175
TABELLE 29: ÜBERSICHT ÜBER DATENGRUNDLAGE ZUM MITTELSPANNUNGSEINFLUSS DER LÄNGSSTEIFE	177

TABELLE 30: AUSWERTUNG DES MITTELSPANNUNGS- UND STRECKGRENZENEINFLUSSES DER LÄNGSSTEIFE	179
TABELLE 31: ÜBERSICHT ZUR AUSWERTUNG DES BLECHDICKENEINFLUSSES DER LÄNGSSTEIFE.....	185
TABELLE 32: ANWENDUNGSGRENZEN FÜR DIE BEMESSUNG NACHBEHANDELTEN SCHWEIßNÄHTE NACH VERSCHIEDENEN REGELWERKEN UND BEMESSUNGSEMPFEHLUNGEN	189
TABELLE 33: GEOMETRIEWERTE DER PRÜFKÖRPER	201
TABELLE 34: MESSWERTE DER SCHWEIßNAHTDICKE A	201
TABELLE 35: MESSWERTE DER LOKALEN NAHTGEOMETRIE	202
TABELLE 36: BASISGEOMETRIE FÜR DIE NUMERISCHEN UNTERSUCHUNGEN.....	208
TABELLE 37: ABWEICHUNGEN ZWISCHEN DMS-MESSUNG UND NUMERISCHER BERECHNUNG AM BEISPIEL DES PRÜFKÖRPERS 2.2	209
TABELLE 38: BERECHNETE ERMÜDUNGSFESTIGKEITEN UND VERGLEICH MIT HFMI IIW RECOMMENDATIONS [68]	212
TABELLE 39: KERBFAKTOREN K_T UNTER VARIATION DES EINBRANDS.....	215
TABELLE 40: VORSCHLAG FÜR TABELLARISCHE ERMITTLUNG DER DURCH QUALIFIZIERTE HFH-VERFAHREN VERBESSERTEN ERMÜDUNGSFESTIGKEIT $\Delta\sigma_{c,imp,HFH}$ FÜR DAS NENNSPANNUNGSKONZEPT FÜR DIE UNBELASTETE QUERSTEIFE	221
TABELLE 41: MINDESTLASTWECHSELZAHLEN ENTSPRECHEND DES DAST-RiLi-BEMESSUNGSVORSCHLAGS AUS TABELLE 40 DER UNBELASTETEN QUERSTEIFE [3].....	222
TABELLE 42: VORSCHLAG FÜR TABELLARISCHE ERMITTLUNG DER DURCH QUALIFIZIERTE HFH-VERFAHREN VERBESSERTEN ERMÜDUNGSFESTIGKEIT $\Delta\sigma_{c,imp,HFH}$ FÜR DAS NENNSPANNUNGSKONZEPT FÜR DEN QUERBELASTETEN STUMPFSTOß	223
TABELLE 43: MINDESTLASTWECHSELZAHLEN ENTSPRECHEND DES DAST-RiLi-BEMESSUNGSVORSCHLAGS AUS TABELLE 42 FÜR QUERBELASTETEN STUMPFSTOß [3].....	224
TABELLE 44: VORSCHLAG FÜR TABELLARISCHE ERMITTLUNG DER DURCH QUALIFIZIERTE HFH-VERFAHREN VERBESSERTEN ERMÜDUNGSFESTIGKEIT $\Delta\sigma_{c,imp,HFH}$ FÜR DAS NENNSPANNUNGSKONZEPT FÜR DIE UNBELASTETE LÄNGSSTEIFE	225
TABELLE 45: MINDESTLASTWECHSELZAHLEN ENTSPRECHEND DES DAST-RiLi-BEMESSUNGSVORSCHLAGS AUS TABELLE 44 DER UNBELASTETEN LÄNGSSTEIFE [3].....	226
TABELLE 46: ABGRENZUNG UNGEEIGNETER AUSFÜHRUNGSVARIANTEN PRINZIPIELL GEEIGNETER KERBDETAILS	227

List of tables

TABLE 1: TYPICAL SETTINGS FOR UIT-APPLICATION ON STRUCTURAL STEEL	44
TABLE 2: ADJUSTMENT POSSIBILITIES FOR HIFIT-DEVICE	45
TABLE 3: TYPICAL SETTINGS FOR PIT-APPLICATION ON STRUCTURAL STEEL.....	47
TABLE 4: TEST PROGRAM	53
TABLE 5: MECHANICAL PROPERTIES OF HOT ROLLED PLATES OF STRUCTURAL STEELS ACCORDING TO EN 10025-2 [22] UND EN10025-1 [21]	61
TABLE 6: HFMI-TREATMENT: DEVICE SETTING AND PARAMETERS OF TREATMENT	63
TABLE 7: MATERIAL PROPERTIES ACCORDING TO INSPECTION CERTIFICATE 3.1 IN ATTACHMENT B...69	
TABLE 8: DIMENSIONS OF GIRDER TEST SERIES T1 (R = 0.1) [3]	72
TABLE 9: TOLERANCES OF THE TRANSVERSE SECTION FOR WIDE-FLANGED BEAMS ACCORDING TO DIN EN 10034 [23]	73
TABLE 10: COMPARISON OF NOMINAL STRESS RANGE $\Delta\sigma_{\text{NOM}}$ OF GIRDER TEST SERIES T2 (R = 0.1) [3] ..78	
TABLE 11: TEST RESULTS OF GIRDER TEST SERIE T1 (R = -1.0) AND MODIFIED NOMINAL STRESS RANGE ACCORDING TO DIN EN 1993-1-9 [16] FROM [3]	101
TABLE 12: CALCULATED LOAD CYCLES TO FAILURE FOR SPECIMENS IN AW CONDITION DEPENDING ON NOMINAL STRESS RANGE	114
TABLE 13: OVERVIEW OF CONTAINING RESEARCH PROJECTS AND THE TEST DATA	122
TABLE 14: OVERVIEW OF THE UNTIL NOW TESTED WELDED CONSTRUCTION DETAILS	127
TABLE 15: NUMBER OF DATA SETS RELATING TO CONSTRUCTION DETAIL	132
TABLE 16: NUMBER OF DATA SETS RELATING TO STEEL GRADE	133
TABLE 17: NUMBER OF DATA SETS RELATING TO POST-TREATMENT METHODS.....	133
TABLE 18: NUMBER OF DATA SETS RELATING TO TEST TYPE	133
TABLE 19: NUMBER OF DATA SETS RELATING TO THE STRESS RATIO R	134
TABLE 20: OVERVIEW OF NOMINAL AND REAL YIELD STRENGTH OF APPLIED MATERIALS OF USED LITERATURE	135
TABLE 21: DETERMINATION OF IMPROVEMENT FACTORS K_F , K_L , K_R ACCORDING TO DÜRR [30]	138
TABLE 22: DESIGN PROPOSAL BASED ON NOMINAL STRESSES ACCORDING TO REFRESH [90]	139
TABLE 23: OVERVIEW OF DATA BASE OF TRANSVERSE ATTACHMENT WITH REGARD TO MEAN STRESS AND YIELD STRENGTH EFFECTS	144
TABLE 24: EVALUATION OF TRANSVERSE ATTACHMENT WITH REGARD TO MEAN STRESS AND YIELD STRENGTH EFFECTS.....	148
TABLE 25: OVERVIEW OF EVALUATION ON TRANSVERSE STIFFENER WITH REGARD TO PLATE THICKNESS EFFECTS.....	159
TABLE 26: OVERVIEW OF DATA OF BUTT WELD WITH REGARD TO MEAN STRESS EFFECTS.....	161
TABLE 27: EVALUATION ON BUTT WELD WITH REGARD TO MEAN STRESS AND YIELD STRENGTH EFFECTS	165
TABLE 28: OVERVIEW OF EVALUATION FOR BUTT WELD WITH REGARD TO PLATE THICKNESS EFFECTS	175
TABLE 29: OVERVIEW OF DATA OF LONGITUDINAL ATTACHMENT WITH REGARD TO MEAN STRESS EFFECTS	177
TABLE 30: EVALUATION ON LONGITUDINAL ATTACHMENT WITH REGARD TO MEAN STRESS AND YIELD STRENGTH EFFECT	179

TABLE 31: OVERVIEW OF EVALUATION ON LONGITUDINAL STIFFENER WITH REGARD TO PLATE THICKNESS EFFECTS.....	185
TABLE 32: LIMITS OF APPLICATION FOR DESIGN OF HFMI-TREATED JOINTS ACCORDING TO DIFFERENT RECOMMENDATIONS AND DESIGN PROPOSALS.....	189
TABLE 33: DIMENSIONS OF SPECIMENS.....	201
TABLE 34: DIMENSIONS OF WELD THROAT THICKNESS A.....	201
TABLE 35: DIMENSIONS OF LOCAL WELD TOE GEOMETRY.....	202
TABLE 36: BASIC GEOMETRY FOR NUMERICAL ANALYSES.....	208
TABLE 37: DEVIATION OF STRAIN GAUGE MEASUREMENT AND NUMERICAL CALCULATION BY THE EXAMPLE OF SPECIMEN 2.2.....	209
TABLE 38: CALCULATED FATIGUE STRENGTH AND COMPARISON WITH HFMI IIW RECOMMENDATIONS [68].....	212
TABLE 39: NOTCH FACTOR K_T FOR VARIATION OF HORIZONTAL PENETRATION OF WELD.....	215
TABLE 40: PROPOSAL FOR TABULAR DETERMINATION OF THE FATIGUE STRENGTH IMPROVED BY QUALIFIED HFMI-TREATMENTS $\Delta\Sigma_{C,IMP,HFMI}$ FOR THE NOMINAL STRESS CONCEPT FOR UNLOADED TRANSVERSE STIFFENER.....	221
TABLE 41: MINIMUM NUMBERS OF LOAD CYCLES ACCORDING TO DAST-GUIDELINE DESIGN PROPOSAL FROM TABLE 40 OF UNLOADED TRANSVERSE STIFFENER [3].....	222
TABLE 42: PROPOSAL FOR TABULAR DETERMINATION OF THE FATIGUE STRENGTH IMPROVED BY QUALIFIED HFMI-TREATMENTS $\Delta\Sigma_{C,IMP,HFMI}$ FOR THE NOMINAL STRESS CONCEPT FOR TRANSVERSE LOADED BUTT JOINT.....	223
TABLE 43: MINIMUM NUMBERS OF LOAD CYCLES ACCORDING TO DAST-GUIDELINE DESIGN PROPOSAL FROM TABLE 42 FOR TRANSVERSE LOADED BUTT WELD JOINT [3].....	224
TABLE 44: PROPOSAL FOR TABULAR DETERMINATION OF THE FATIGUE STRENGTH IMPROVED BY QUALIFIED HFMI-TREATMENTS $\Delta\Sigma_{C,IMP,HFMI}$ FOR THE NOMINAL STRESS CONCEPT FOR UNLOADED LONGITUDINAL STIFFENER.....	225
TABLE 45: MINIMUM NUMBERS OF LOAD CYCLES ACCORDING TO DAST-GUIDELINE DESIGN PROPOSAL FROM TABLE 44 OF UNLOADED LONGITUDINAL STIFFENER [3].....	226
TABLE 46: SEPARATION OF INAPPROPRIATE CONSTRUCTION VARIANTS FROM APPROPRIATE CONSTRUCTION DETAILS.....	227

Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

%	Prozent
μm	Mikrometer
aw	As-welded (im Schweißzustand belassen)
BT	Bauteilversuch
DL	Durchläufer
DMS	Dehnmessstreifen
E	Elastizitätsmodul
F_o	Oberlast
F_u	Unterlast
f	Frequenz
f_y	Streckgrenze
f_u	Zugfestigkeit
GM	Grundmaterial
HFH	Höherfrequente Hämmerverfahren
HFMI	High Frequency Mechanical Impact
HiFIT	High Frequency Impact Treatment
Hz	Hertz
kg	Kilogramm
k_N	Lebensdauererlängerungsfaktor
k_s	Abminderungsfaktor für den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit zur Berücksichtigung der Größenabhängigkeit
KV	Kleinversuch
m	Meter
m	Neigung der Ermüdungsfestigkeitskurve
mm	Millimeter
Mpa	Megapascal
N	Lastwechselzahl
N	Newton
NÜ	Nahtübergang
N/mm	Newton pro Millimeter
N/mm ²	Newton pro Quadratmillimeter
PIT	Pneumatic Impact Treatment
R	Spannungsverhältnis
t	Blechdicke
t	Tonne
T	Trägerserie

UIT	Ultrasonic Impact Treatment
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite (Längsspannung)
$\Delta\sigma_1$	1. Hauptspannungsschwingbreite
$\Delta\sigma_c$	Bezugswert für die Ermüdungsfestigkeit bei $N_c = 2 \times 10^6$ Schwingspiele
$\Delta\sigma_{c,red}$	Reduzierter Bezugswert für die Ermüdungsfestigkeit
σ_m	Mittelspannung
σ_o	Oberspannung
σ_u	Unterspannung

1 Einleitung

1 Introduction

Kurzfassung

Dieses Kapitel gibt einen einleitenden Überblick über das Forschungsprojekt „Entwicklung einer DASt-Richtlinie für Höherfrequente Hämmerverfahren“. Basierend auf den Anlass dieser Forschungsarbeit wird die Notwendigkeit einer DASt-Richtlinie für die Berücksichtigung der Höherfrequenten Hämmerverfahren bei der Bemessung ermüdungsbeanspruchter Schweißdetails erläutert. Daraus leiten sich die konkreten Fragestellungen des Projekts sowie die Motivation der geplanten Untersuchungen ab, die zur Beantwortung der ungeklärten Fragestellungen führen sollen. Der Ablauf der daraus folgenden Untersuchungen wird in Form eines Arbeitsdiagramms erläutert und die einzelnen Ziele der Arbeitspakete gemäß dem Forschungsantrag definiert, bzw. konkretisiert.

Abstract

This chapter gives an introductory overview of the research project “Development of a DASt guideline for High Frequency Mechanical Impact treatments”. Based on the motivation of this research work the necessity of a DASt guideline for the consideration of the High Frequency Mechanical Impact treatment in the design of fatigue loaded, welded structures is annotated. Thereof the specific issues of the project and the motivation of the planned studies, that should clarify the open issues, are derived. The process of the following studies is annotated in form of an operation diagram and the single aims of the work packages are defined or rather concretized in accordance to the proposal of the research project.

1.1 Anlass des Forschungsprojekts und Notwendigkeit einer bauaufsichtlichen Regelung zur Berücksichtigung der HFH-Verfahren bei der Bemessung

1.1 Motivation of research project and need of regulation through building authorities for the consideration of HFMI-treatments on fatigue design

Eine Möglichkeit, die Ermüdungsschädigung bei geschweißten Konstruktionen mit wechselnder Beanspruchung zu reduzieren und auch die Vorteile der höherfesten Stähle zu nutzen, stellt der Einsatz von Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung – speziell der höherfrequenten Hämmerverfahren - dar. Höherfrequente Hämmerverfahren (HFH) unterscheiden sich von den bislang unter dem Begriff Hämmerverfahren bekannten Methoden, durch die Hämmfrequenz und die Pin-Geometrie und damit durch die Intensität der Behandlung und den erreichten Überdeckungsgrad. Zwar werden in vielen Anwendungsbereichen, vor allem des Maschinenbaus, bereits sehr gute Ergebnisse mit dem Einsatz HFH-Verfahren erzielt, jedoch kann ohne eine bauaufsichtliche Regelung keine breite Anwendung im Bauwesen realisiert werden. Bislang ist das Schleifen der Schweißnahtübergänge (Beseitigen der geometrischen Kerbe) das wirtschaftlichste, bauaufsichtlich anerkannte Verfahren im Bauwesen zur Schweißnahtnachbehandlung. Durch das Schleifen kann bei ordnungsgemäß geschweißter Naht maximal eine 15-prozentige Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit erreicht werden. Der Einsatz der HFH-Verfahren im Bauwesen ist mit Blick auf die augenblickliche Situation für viele Stahlbauunternehmen wirtschaftlich interessant, da sich diese Verfahren durch den im Vergleich zum Schleifen geringeren Arbeitsaufwand (Personalkosten) und durch den größeren Zugewinn an Ermüdungsfestigkeit und damit realisierbarem reduzierten Materialeinsatz und Schweißvolumen auszeichnen. Der im Vergleich zum Beschleifen größere Zugewinn an Ermüdungsfestigkeit lässt sich durch die Einprägung günstiger Druckeigenstressungen erklären.

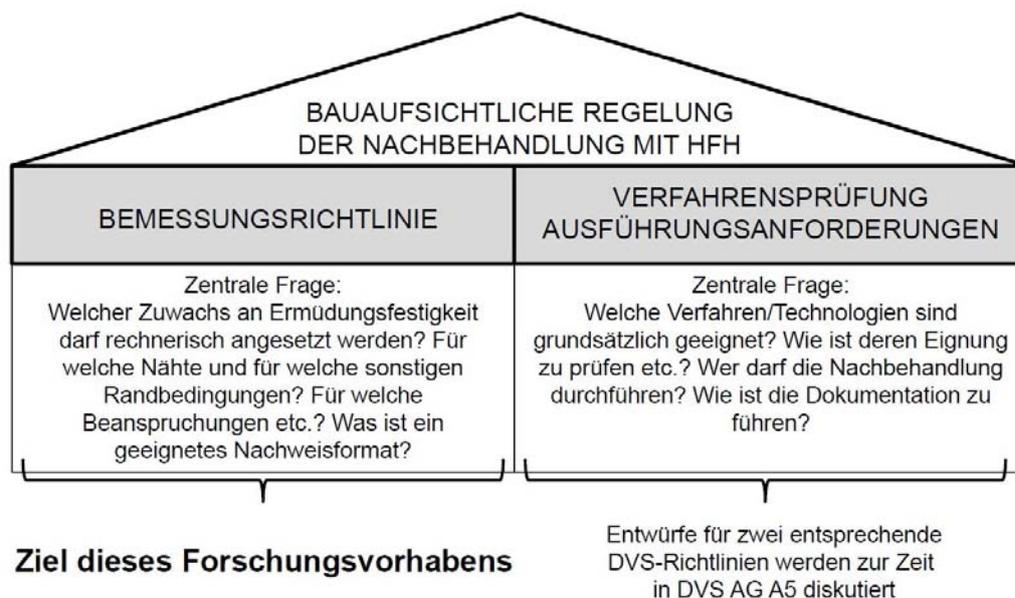


Abbildung 1-1: Integrales Konzept für HFH im Rahmen der Bauaufsichtlichen Regelungen

Figure 1-1: Concept for HFMI in context of rules by the building authority

Der Einsatz HFH-Verfahren zusammen mit einem rechnerisch ansetzbaren Ermüdungsfestigkeitsgewinn wird im Bauwesen durch das Fehlen entsprechender Regelwerke bislang mit Ausnahme der ZiE verhindert. Eine bauaufsichtliche Regelung in Form einer Norm oder Richtlinie zur Berechnung und Quantifizierung der erzielbaren Effekte sowie entsprechende Qualitätssicherungssysteme sind für die Anwendung im Bauwesen notwendige Voraussetzung für die Akzeptanz in der Praxis. Durch das Forschungsvorhaben soll ein Vorschlag für eine Bemessungsempfehlung erarbeitet werden, siehe Abbildung 1-1, die dann als DAST-Richtlinie veröffentlicht werden kann und damit bauaufsichtlichen Regelungscharakter erhält.

1.2 Forschungsziele

1.2 *Aims of the research project*

Für die Erstellung einer Bemessungsempfehlung besteht Klärungsbedarf hinsichtlich folgender Fragen:

Forschungsziel 1: Einheitliches Bemessungskonzept

Zur Zeit gibt noch kein einheitliches normungsgerechtes Bemessungskonzept, mit dem sich die Höhe des Festigkeitsgewinns durch eine Schweißnahtnachbehandlung mit HFH-Verfahren zuverlässig berechnen lässt. Das Ziel des beantragten Vorhabens ist die Erstellung eines Vorschlags für eine DAST-Richtlinie zur Bemessung geschweißter ermüdungsgefährdeter Bauteile unter Anwendung HFH-Verfahren. Diese DAST-Richtlinie soll die Anwendung der HFH-Verfahren im Bauwesen regeln und die Bemessung bzw. rechnerische Abschätzung der lebensdauerverlängernden Wirkung sicher ermöglichen.

Ebenso sind entsprechende Randbedingungen wie anwendbare Kerbdetails, Beschränkung der maximalen einwirkenden Druckspannung, um eine Entlastung zu verhindern, Bauteildickeneinfluss, Werkstoffabhängigkeit, Einfluss des Spannungsverhältnisses R und des Zeitpunkts der Nachbehandlung festzulegen.

Ausgehend von den in den Forschungsvorhaben FOSTA P620 [59] und REFRESH [90] gewonnenen Erkenntnissen soll unter Einbeziehung aller bekannten Untersuchungen sowie weiterer aktueller Forschungsarbeiten im Bereich des Hochfrequenzhämmerns eine anwenderfreundliche Berechnungsgrundlage erarbeitet werden. Diese DAST-Richtlinie soll für HFH-Verfahren ein einfaches Bemessungskonzept zur Verfügung stellen und zusammen mit den im Entstehen begriffenen DVS-Richtlinien oder ähnlichen Regelungen unter Einhaltung von Qualitätsstandards eine Regelanwendung in der Praxis erlauben und somit den sicheren und wirtschaftlichen Einsatz der HFH-Verfahren ermöglichen.

Zu dem bereits bestehenden Wissen, u.a. von Dürr [30], Weich [99] und dem IIW-Dokument [68], sollen die in den Forschungszielen 2 bis 4 gewonnenen Erkenntnisse in die Entwicklung der DAST-Richtlinie einfließen.

Forschungsziel 2: Bauteileinfluss (Eigenspannungseinfluss)

Die meisten Untersuchungen zur Nachbehandlung stützen sich auf Versuche an Kleinprüfkörpern ab. Bisher wurden nur relativ wenige Bauteil- bzw. Trägerversuche durchgeführt, so dass daher eine sehr pauschale Abminderung von 20 % auf die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen zur Erfassung der Eigenspannungseinflüsse vorgenommen wird, siehe hierzu P620 [59] bzw. Dürr [30]. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen daher in einer größeren Versuchsreihe

gezielt Bauteilversuche zur Absicherung des Bemessungskonzepts und zur Spezifizierung des Abminderungsfaktors durchgeführt werden.

Forschungsziel 3: Mittelspannungseinfluss

In Abbildung 1-2 ist zu sehen, dass sich der Einfluss der Mittelspannung bzw. des Spannungsverhältnisses R lediglich auf den Zug- bzw. Zugschwellbereich mit $R > 0$ beschränkt. Dies ist damit begründet, dass die überwiegende Anzahl der Versuche bisher im Bereich $R > 0$ durchgeführt wurde, hingegen nur wenige Versuche an Kleinproben und Bauteilversuchen im Bereich $R < 0$ existieren.

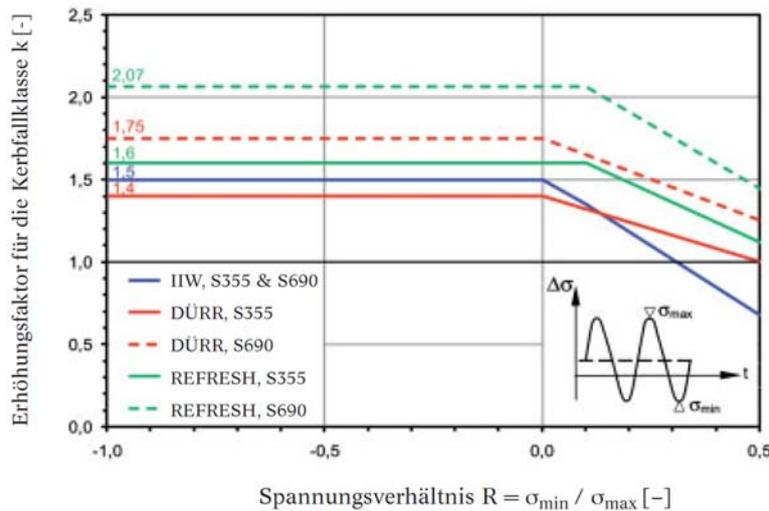


Abbildung 1-2: Erhöhungsfaktoren für die Kerbfallklasse durch Höherfrequentes Hämmern nachbehandelter Schweißnähte in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis R nach [40]

Figure 1-2: Improvement factors according to different fatigue design concepts for high frequency hammer peened joints depending on the stress ratio R from [40]

Diese wenigen Versuche in [59], [90] zeigen jedoch, dass für $R < 0$, durchaus größere Erhöhungsfaktoren für die Ermüdungsfestigkeit möglich sind [40]. Demzufolge sollen durch versuchstechnische Untersuchungen zum Mittelspannungseinfluss überprüft werden, inwiefern eine Anpassung der Erhöhungsfaktoren sinnvoll sein kann.

Forschungsziel 4: Betriebsbelastungen

In den bisher durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen wurde der Einfluss der Nachbehandlung unter Einstufenbelastungen (Wöhler-Versuch) untersucht. Daher soll in einer Versuchsreihe gezielt der Einfluss von Betriebsbelastungen (mehrstufiges Lastkollektiv) Gegenstand der Betrachtungen sein. Dabei sollen sog. „Reihenfolge-Effekte“ identifiziert und, falls erforderlich, eine Beschränkung der maximalen Druckspannungen (um eine Entlastung zu verhindern) definiert werden.

Forschungsziel 5: Nachbehandlung bei Vorbelastung

Im Rahmen einer Versuchsreihe sollen auch die Ermüdungsfestigkeitsgewinne bei auf Ermüdung vorbeanspruchten Konstruktionen (rechnerische Ausnutzung der Lebensdauer von 75 % bis 90 %) untersucht werden. Hierbei handelt es sich um erste Prinzipuntersuchungen, um für diesen wichtigen Anwendungsbereich im Bereich der Ertüchtigung bestehender Konstruktionen erste Ansätze zu bieten.

1.3 Lösungsweg zur Erreichung der Forschungsziele

1.3 Approach to achieve the research objectives

Die aufgeführten Forschungsziele sollen auf Grundlage experimenteller und theoretischer Untersuchungen erreicht werden. Dazu sind die in Abbildung 1-3 dargestellten Arbeitsschritte geplant.

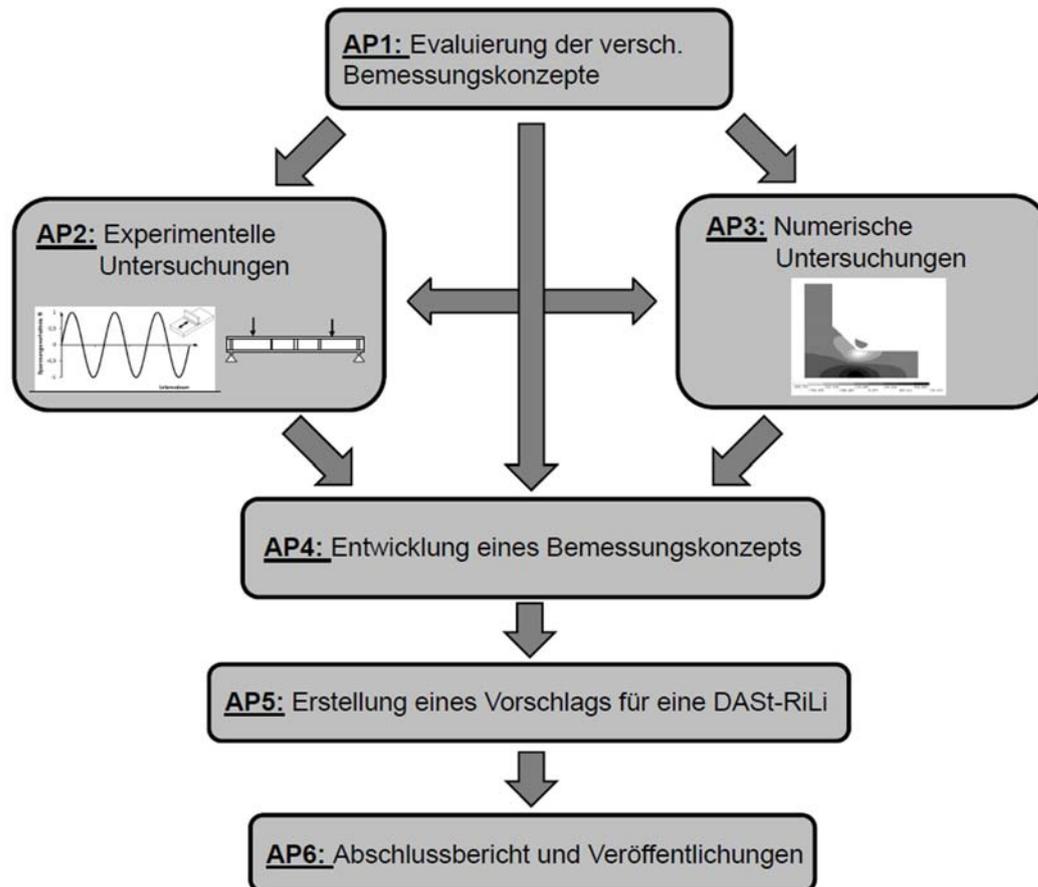


Abbildung 1-3: Arbeitsdiagramm

Figure 1-3: Operating diagram

Arbeitspaket 1: Evaluierung der verschiedenen Bemessungskonzepte

In einem ersten Arbeitsschritt werden für verschiedene Anwendungsgebiete vorhandene Bemessungskonzepte für die Ermüdungsbemessung geschweißter Stahlkonstruktionen geprüft und verglichen. Dabei steht die Berücksichtigung von Schweißnahtnachbehandlungsmethoden, sowie die Erfassung und Gegenüberstellung der Gültigkeitsbereiche, -grenzen und -lücken im Vordergrund. Die Umsetzung und Einbringung aktuell zur Verfügung stehende Forschungsergebnisse, u.a. [61], [30], [99], und Bemessungsempfehlungen für HFH-Verfahren wird ebenfalls berücksichtigt.

Im Zuge der zahlreichen bisher durchgeführten experimentellen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass bei Hämmerverfahren die Steigerung der Ermüdungsfestigkeit wesentlich durch die Größe der eingebrachten Druckeigenspannungen bestimmt wird und dass dadurch bedingt eine ausgeprägte

- Werkstoffabhängigkeit, beschrieben durch die Streckgrenze f_y und eine
- Mittelspannungsabhängigkeit, beschrieben durch das Spannungsverhältnis

$$R = \sigma_{max} / \sigma_{min}$$

vorliegt [40].

Um die unterschiedlichen Bemessungskonzepte genauer zu untersuchen und die Anwendungsbereiche, bzw. –grenzen zu identifizieren, soll eine Parameterstudie mit Vergleichsrechnungen durchgeführt werden. Zudem soll geprüft werden, inwiefern sich die Bemessungsverfahren, die für bestimmte Kerbdetails wie die Quersteife hergeleitet wurden, sich auf andere Kerbdetails anpassen lassen.

Arbeitspaket 2: Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen dienen der Auflösung des noch vorhandenen Klärungsbedarfs. Für alle Versuchsreihen sollen zwei typische, derzeit auf dem deutschen Markt befindliche HFH-Verfahren (PiTEC und HiFIT) zum Einsatz kommen. Aufgrund des begrenzten Versuchsumfangs wird hier die Stahlsorte S355 behandelt. Mit steigender Streckgrenze des Materials steigt auch die Höhe der durch Hämmern eingebrachten Druckeigenstressungen. Durch die Materialauswahl S355 werden demnach eher konservative Ergebnisse erzielt. Eine Übertragbarkeit auf andere Stahlgüten kann durch Einbeziehung vorhandener Versuchsergebnisse erfolgen.

Die Versuche umfassen sowohl Träger- als auch Kleinprüfkörperversuche zum Konstruktionsdetail der unbelasteten Quersteife, einem der häufigsten Details im Stahlbau. Das Detail der Quersteife wird schwerpunktmäßig geprüft, um zum einen an vorhandene Ergebnisse anschließen zu können und zum anderen durch die Anwendung auf ein vergleichsweise scharfes Kerbdetail klare untere Grenzwerte zu bekommen. Die Übertragung auf andere Details anhand vorliegender Versuchsergebnisse soll in erster Linie durch numerische Untersuchungen, siehe Arbeitsschritt 3, erfolgen.

Im Sinne einer einheitlichen Prüfung (Maschineneinfluss) werden dabei die geplanten Trägerversuche an der Universität Stuttgart und die Kleinteilversuche am KIT durchgeführt. Im Rahmen des Versuchsprogramms sollen Fragestellungen zum Bauteil- und Mittelspannungseinfluss als auch zum Verhalten unter Betriebsbelastung geklärt werden.

Arbeitspaket 3: Numerische Untersuchungen und rechnerische Lebensdauerabschätzung

Anhand der Messdaten aus Arbeitsschritt 2 wird ein FE-Modell für numerische Untersuchungen kalibriert werden. Die numerischen Untersuchungen umfassen dabei die Nachrechnung der Schwingversuche zur Ermittlung der Nenn-, Struktur- und Kerbspannungen. Mit Hilfe der verschiedenen Konzepte zur Beurteilung der Ermüdungssicherheit sollen die in Arbeitspaket 2 ermittelten als auch bereits vorhandenen Ergebnisse nachgerechnet werden.

Nennspannung. Die Nennspannung ist die elastisch errechnete Spannung im betrachteten Querschnitt ohne Berücksichtigung örtlicher spannungserhöhenden Effekte einer Schweißverbindung [51]. Die zulässige Spannung bzw. die Ermüdungsfestigkeit von Kerbdetails hängt von der Kerbwirkung ab, so dass mit zunehmender Kerbschärfe der Schweißkonstruktion die zulässige Spannung und damit auch die Ermüdungsfestigkeit abnimmt. Die Kerbdetails und deren zulässige Spannungen sind in Regelwerken wie EN 1993-1-9 [16] oder [51] zusammen-

gefasst. Voraussetzung für die Anwendung dieses Konzepts für nachbehandelte Schweißverbindungen sind experimentelle Ergebnisse aus Ermüdungsversuchen für die zu bewertenden Details.

In diesem Arbeitsschritt sollen die Ergebnisse aus den versuchstechnischen Untersuchungen aus Arbeitspaket 2 wie auch vorhandene Ergebnisse von Dürr [30] und anderen mit dem Nennspannungskonzept nachgerechnet und mit den Kerbdetails des Eurocode EN 1993-1-9 verglichen werden.

Strukturspannung. Die Strukturspannung enthält alle spannungserhöhenden Effekte des konstruktiven Details, jedoch nicht die Spannungskonzentration aus der Schweißnaht selbst [51]. Das Strukturspannungskonzept findet u.a. Anwendung in Fällen, bei denen es einer genaueren Bewertung des Kerbdetails bedarf. Hier ist insbesondere an die Übertragung der Ergebnisse auf andere Schweißnahtgeometrien und Kerbdetails gedacht. Die Strukturspannungsermittlung erfolgt durch Messung mittels Dehnmessstreifen am Versuchskörper und durch Nachrechnung mit FE-Berechnung von Spannungen im festgelegten Abstand zum Schweißnahtfußpunkt. In EN 1993-1-9 sind im Anhang B Ermüdungsfestigkeiten für bestimmte Schweißdetails bei Verwendung von Strukturspannungen angegeben. Eine Übertragungen und Einordnung von HFH nachbehandelter Schweißdetails ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, da die festigkeitssteigernden Effekte der Nachbehandlung bisher nicht berücksichtigt sind. Hier kann die Kombination aus Versuchen und Nachrechnungen Anhalte liefern.

Kerbspannung. Die Kerbspannung ist die gesamte Spannung im Kerbgrund, wobei ein linear-elastisches Materialverhalten angenommen wird [51]. Die Kerbspannung entspricht demnach der Strukturspannung plus dem nichtlinearen Anteil der Spannungsspitze. Der Vorteil des Kerbspannungskonzepts gegenüber dem Strukturspannungskonzept liegt darin, dass die lokalen Geometrieparameter der Schweißnaht, z.B. ein ausgerundeter Schweißnahtübergang, mit erfasst werden können. Dadurch können mit dem Kerbspannungskonzept Rückschlüsse auf den genauen Anrissort gezogen werden. Die Anwendung des Konzepts setzt jedoch die Kenntnis der örtlichen Kerbspannung voraus. Können diese nicht durch Anwendung einfacher parametrisierter Formeln aus der Literatur ermittelt werden, sind aufwändige FE-Berechnungen erforderlich. In [30] wurden so ein Teil der k-Faktoren hergeleitet, bzw. Grenzwerte für den Fall des Wurzelanrisses abgesteckt.

Ziel der numerischen Untersuchungen ist es, die Gültigkeitsbereiche und Anwendergebiete möglichst umfassend abzudecken und die vorhandene experimentelle Versuchsdatenbasis zu erweitern.

Arbeitspaket 4: Bemessungskonzept

Aus den Erkenntnissen aus den Arbeitspaketen 1 bis 3 wird ein Bemessungskonzept entwickelt bzw. bestehende Konzepte erweitert. Innerhalb einer Meilensteinentscheidung des projektbegleitenden Arbeitskreises wird hierbei eine Festlegung für ein Konzept getroffen. Maßgebend hierfür sind die Anwenderfreundlichkeit, sowie die Vereinbarkeit mit vorhandenen Regeln und Richtlinien. Des Weiteren sollen die Gültigkeitsbereiche und Anwendergebiete möglichst umfassend beschrieben werden, so dass ein normungsreifen Konzept entsteht.

Arbeitspaket 5: Erstellung eines Vorschlags für eine DAST-Richtlinie

Gemäß den Anforderungen nach DIN 820 Teil 2 und 4 [10], [11] wird ein Entwurf für ein Regelwerk erstellt, das die Bemessung geschweißter Bauteile unter Anwendung höherfrequenter

Hämmerverfahren hat. Dieser Entwurf wird nach Ende der Projektlaufzeit als Richtlinien-Vorschlag beim DAST eingereicht werden.

Arbeitspaket 6: Abschlussbericht und Veröffentlichungen

Begleitend zum Projekt werden in Fachzeitschriften und auf Tagungen aktuelle Forschungsergebnisse und Vorhabenbeschreibungen veröffentlicht, um möglichst viele Anwender und Interessenvertreter über den Fortschritt des Projekts zu informieren und gegebenenfalls auch für eine weitere Mitarbeit im Arbeitskreis zu gewinnen. Der vorliegende Abschlussbericht enthält neben Hintergründen und den einzelnen Herleitungen, auch Anwendungsbeispiele für den Anwender in der Praxis.

2 Höherfrequente Hämmerverfahren (HFH)

2 High Frequency Mechanical Impact Treatment (HFMI)

Kurzfassung

Dieses Kapitel stellt einleitend die Höherfrequenten Hämmerverfahren (HFH) zur Steigerung der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Konstruktionen im Allgemeinen vor. Neben den allgemein gültigen Voraussetzungen zur Anwendung der HFH-Verfahren werden zum einen die Wirkungsweise, sowie die damit einhergehenden Effekte auf die randschichtnahen Bereiche durch HFH-Verfahren aufgezeigt.

Im Weiteren werden die im Projekt betrachteten (UIT, PIT und HiFIT) und im Projekt angewandten Verfahren (HiFIT und PIT) detaillierter beschrieben und die dazugehörigen Anwendungsparameter gegeben. Außerdem wird die Vergleichbarkeit der Wirkungsweise und Effektivität der bisher angewandten Verfahren diskutiert.

Abstract

This chapter initially introduces the High Frequency Mechanical Impact (HFMI) treatments to increase the fatigue strength of welded structures in general. Besides the generally valid requirements for the application of the HFMI methods, the mode of action as well as the effects on the areas close to the edge layers of welds due to HFMI treatment application are demonstrated.

Furthermore, the methods, which are considered within the project (UIT, PIT and HiFIT) and the ones, which are used in the project (HiFIT and PIT) for deeper investigations are more detailed described and the associated application parameters are given. Moreover the comparability of the mode of action and effectiveness of the existing methods are discussed.

2.1 Voraussetzungen zur Anwendung der HFH-Verfahren

2.1 Requirements for the application of HFMI-treatment

Die Anwendung der Höherfrequenten Hämmerverfahren beschränkt sich auf Schweißnähte und deren geometrische Kerben, die nach Abschluss des Schweißvorgangs von außen zugänglich sind, da die Schweißnahtnachbehandlung direkt auf der Oberfläche der Schweißnaht durchgeführt wird. So können beispielsweise ausschließlich Schweißnahtübergänge und keine Schweißnahtwurzeln behandelt werden. Folglich können auch nur die Ermüdungseigenschaften dieser zugänglichen Schweißnahtbereiche verbessert werden.

Ein weiterer Aspekt ist die Beanspruchungsrichtung. Denn in Abhängigkeit der Beanspruchungsrichtung zum nachbehandelten Schweißnahtübergang richtet sich die Effektivität dieser Verfahren. Schweißnahtkerben senkrecht zur Beanspruchungsrichtung gelten allgemein als weitaus kritischer hinsichtlich ihrer Ermüdungsfestigkeit als Schweißnahtkerben parallel zur Beanspruchungsrichtung. So ist die Ermüdungsfestigkeit senkrecht zur Schweißnahtkerbe beanspruchter Nähte allgemein schlechter eingestuft als die der längs belasteten Kerben. Am Beispiel der unbelasteten Längssteife findet die Rissinitiierung immer am kurzen Kehlnahtübergang statt und in den seltensten Fällen an der Längsnaht. Eine wesentliche Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit durch die Schweißnahtnachbehandlung mittels HFH wird daher hauptsächlich an senkrecht zum Nahtübergang beanspruchten Nähten erreicht, wo durch eine höhere Kerbwirkung eine weitaus geringe Ermüdungsfestigkeit vorliegt.

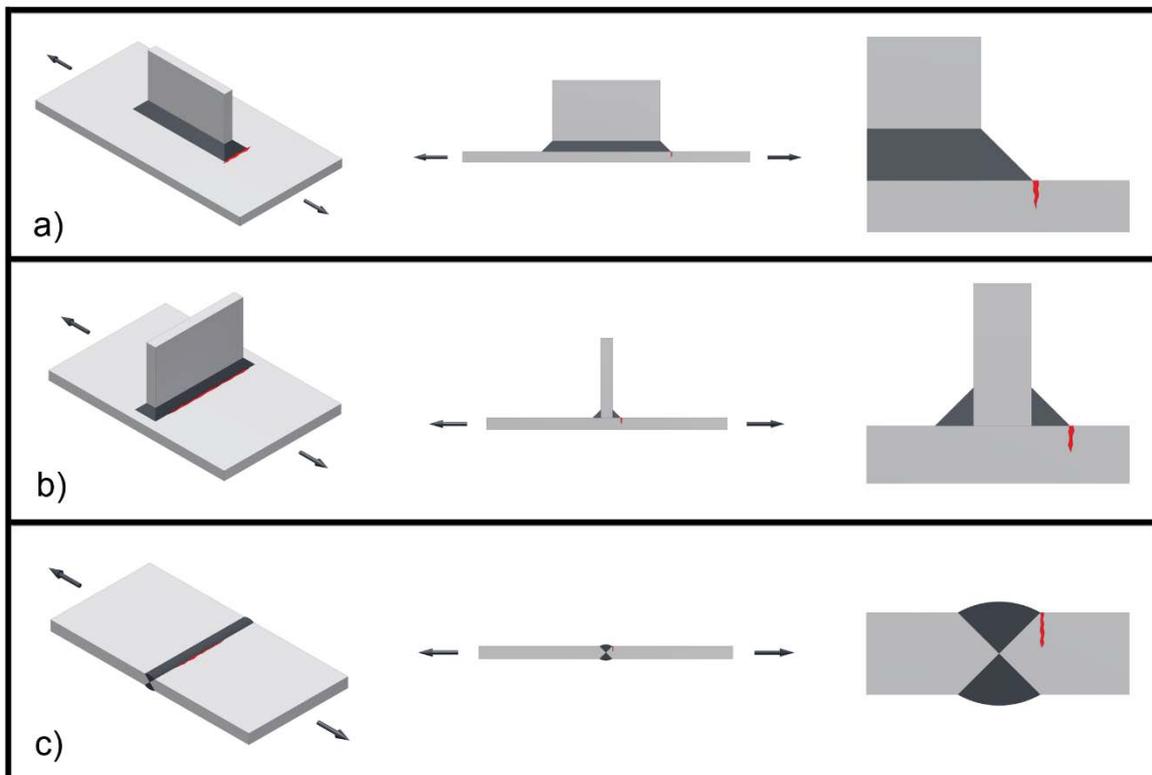


Abbildung 2-1: HFH-geeignete Konstruktionsdetails

Figure 2-1: HFMI-applicable construction details

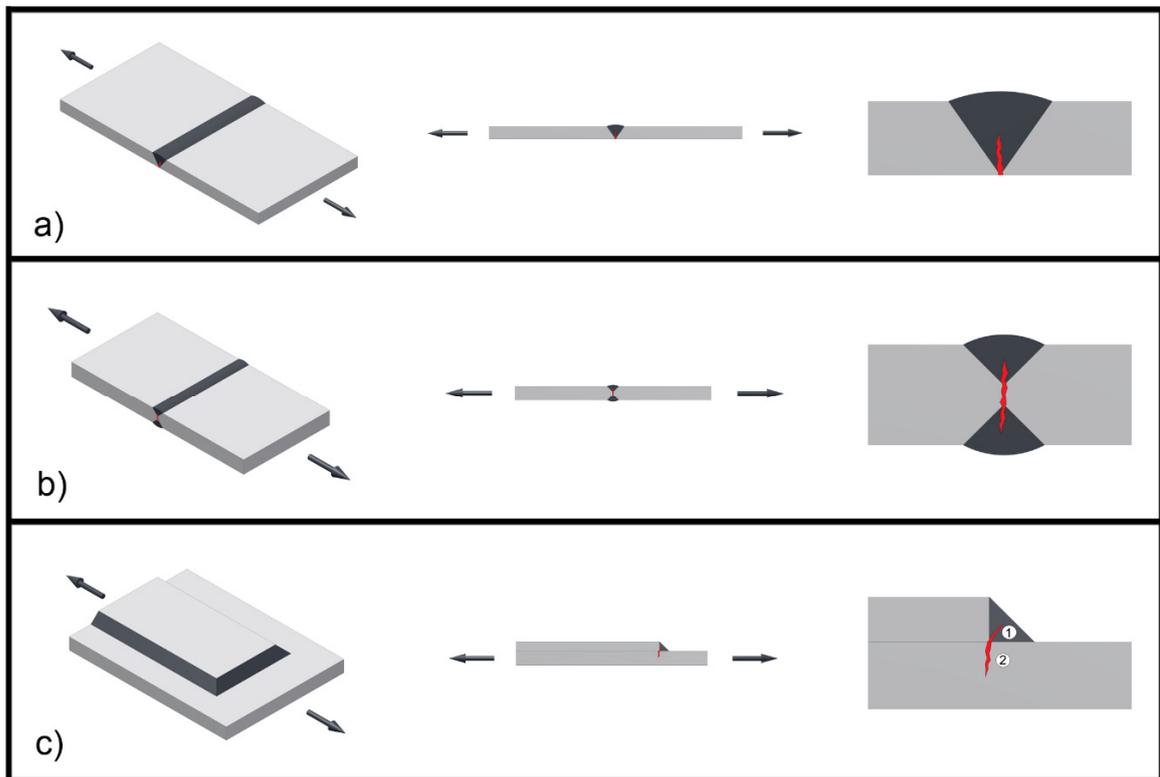


Abbildung 2-2: HFH-ungeeignete Konstruktionsdetails

Figure 2-2: Non-HFMI-applicable construction details

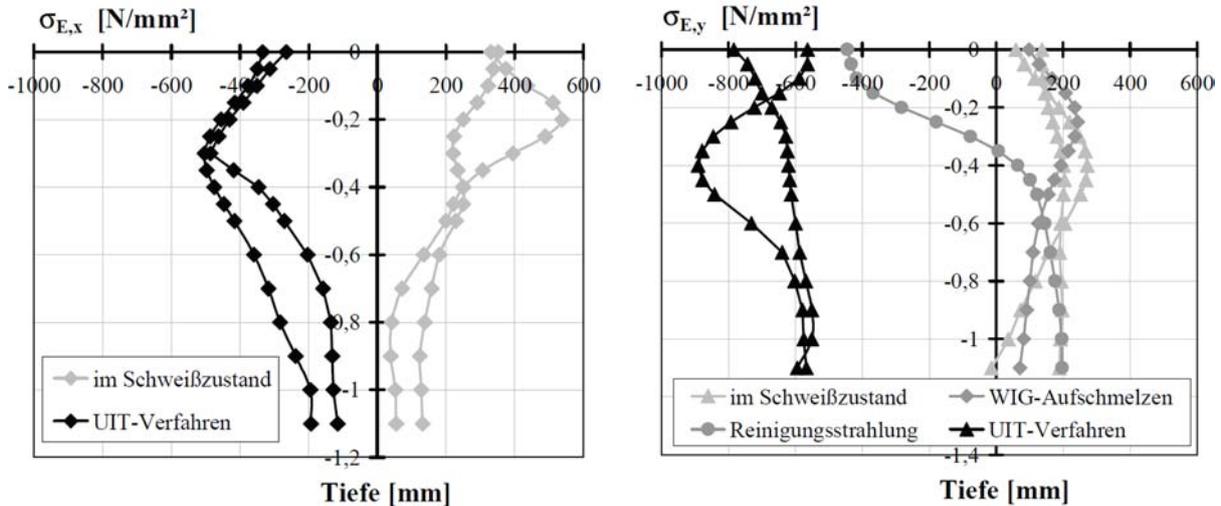
2.2 Wirkungsweise und Wirksamkeit der HFH-Verfahren

2.2 Mechanism and effectiveness of HFH-treatment

Veränderung des Eigenspannungszustands. Die verbesserte Ermüdungsfestigkeit HFH-nachbehandelter Schweißnähte beruht in erster Linie auf der Änderung des Eigenspannungszustands an der kritischen Stelle der Schweißnahtkerbe. Durch die mit höherfrequenter Geschwindigkeit erzeugten Einschläge des gehärteten Bolzens entlang des Schweißnahtübergangs, also der Schweißnahtkerbe, werden dort durch plastische Verformung lokal Druckeigenspannungen erzeugt. Diese wirken sich in Überlagerung mit Spannungen aus der äußeren Bauwerksbeanspruchung gegenüber den zuvor vorliegenden Zugeigenspannungen positiv auf die Lebensdauer der Schweißnahtkerbe aus.

Eigenspannungen lassen sich in zwei Richtungen aufteilen, die Eigenspannungen senkrecht zur Schweißnaht und parallel zur Schweißnaht. Da die HFH-geeigneten Details senkrecht zur Schweißnaht beansprucht sind (siehe Abbildung 2-1) ist davon auszugehen, dass die Eigenspannungsrichtung senkrecht zur Schweißnaht die maßgebliche ist, da sich die inneren und äußeren Spannungen überlagern. [30] Abbildung 2-3 zeigt den Tiefenverlauf der Eigenspannungen senkrecht zur Schweißnaht für eine unbehandelte und eine UIT-behandelte Probe aus S355 und S690 aus [30]. Bemerkenswert ist dabei die Tiefenwirkung der eingebrachten Druckeigenspannungen, die ihren Höchstwert in einem Tiefenbereich von 0,2 bis 0,5 mm erreicht und ab einer Tiefe von 0,6 bis 0,8 mm abfällt.

Die Höhe der durch HFH-Anwendung eingebrachten Druckeigenspannungen richtet sich nach den Materialeigenschaften, so werden mit steigender Streckgrenze des behandelten Materials größere Eigenspannungen erzeugt, siehe Abbildung 2-3.



links: S355

rechts: S690

Abbildung 2-3: Eigenspannungsmessungen senkrecht zur Schweißnaht in die Tiefe am S355 und S690 aus [30]

Figure 2-3: Residual stress measurements perpendicular to weld in depths at S355 and S690 from [30]

Verbesserung der Kerbgeometrie. Zusätzlich findet durch die plastische Verformung am Schweißnahtübergang eine Vergrößerung des Kerbradius statt, so dass eine verbesserte Kerbgeometrie erreicht wird. Dürr [30] hat mithilfe von Silikonabdrücken die geometrischen Abmessungen der Versuchsserien unterschiedlicher Werkstoffe und Nachbehandlungszustände erfasst und diese zunächst mittels Statistik ausgewertet. Die Mittelwerte der Geometrieabmessungen der verschiedenen Nachbehandlungszustände übertrug er in ein Finite-Elemente Modell. So konnte er für das jeweilige Nachbehandlungsverfahren die entsprechende Kerbspannung, bzw. Kerbfaktoren K_t aufgrund der variierenden Kerbschärfe ermitteln. Die Abweichungen der unbehandelten zu den behandelten Kerbfaktoren K_t betrug ca. 14 bis 20 %. Der Einfluss der Kerbwirkung auf die Ermüdungsfestigkeit ließ sich anschließend mithilfe von Kerbspannungswöhlerlinien erfassen. Dabei hat sich herausgestellt, dass zwar für das WIG-Aufschmelzen die Änderung der Kerbgeometrie die wesentliche Einflussgröße darstellt, für das UIT-Verfahren jedoch nur eine geringe Rolle spielt, [30].

Ein weiterer Versuch, die maßgebliche Wirkungsweise für die erhöhte Ermüdungsfestigkeit zu bestimmen, sind die Untersuchungen von Weich [99] mit nachträglichem Spannungsarmglühen HFH-behandelter Proben. Hierfür wurden Eigenspannungsmessungen an HiFIT- und UIT-behandelten Stumpfstößen durchgeführt, anschließend wurde die Proben 15 Minuten spannungsarmgeglüht und danach wiederum Eigenspannungsmessungen durchgeführt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass die durch das Hämmern induzierten Eigenspannungen weitestgehend durch das Glühen abgebaut wurden, siehe Abbildung 2-4. In den Diagrammen mit HiFIT- und UIT-behandelten Proben lassen sich größere Ausschläge in der nachbehandelten Zone für die maßgebenden Quereigenspannungen erkennen, die bis zu Werten von -800 N/mm² reichen. Die darunterliegenden Diagramme zeigen die Messwerte nach einem, an die

HFH-Behandlung anschließenden Spannungsarmglühen. Die Änderung des Eigenspannungszustands wird deutlich und es liegen nur noch Druckeigenspannungen von maximal -200 N/mm^2 vor.

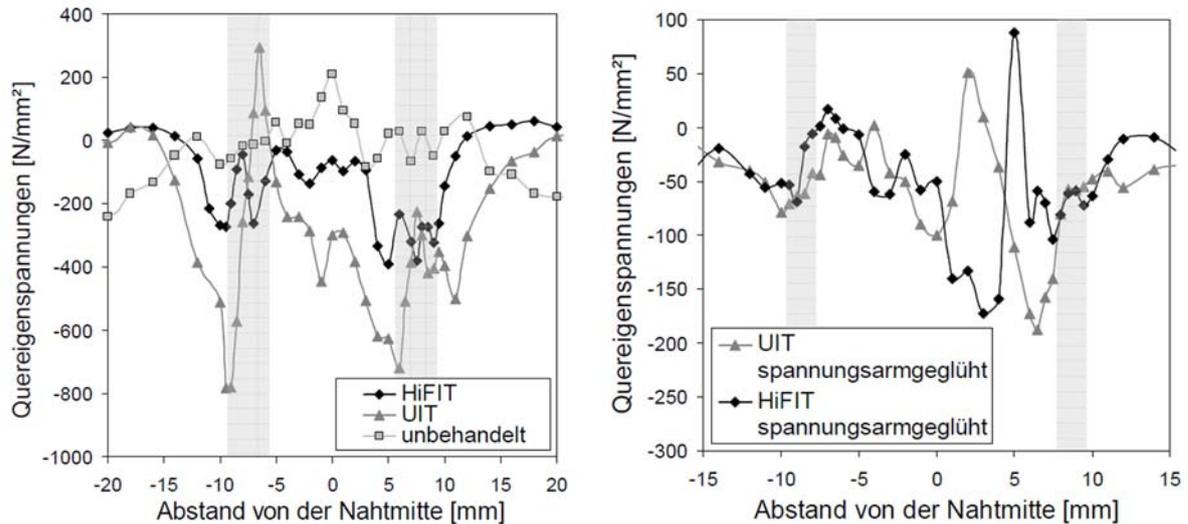


Abbildung 2-4: Vergleich der Quereigenspannungen an der Oberfläche am S690 für unbehandelt, UIT-, HiFIT und HFH und anschließend spannungsarmgeglühte Zustände [99]

Figure 2-4: Comparison of transverse residual stresses at the surface of S690 in as-welded, UIT, HiFIT and HFMI and [99]

So lag in den Proben zu Beginn der Ermüdungsversuchsdurchführung der gleiche Eigenspannungszustand vor, wie vor der HFH-Behandlung, die geometrischen Änderungen durch die HFH-Behandlung lagen jedoch noch vor. Abschließend wurden diese Proben, sowie eine Referenzserie im unbehandelten und zwei Referenzserien (UIT und HiFIT) im HFH-behandelten Zustand getestet. Bei der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse der im Nachhinein spannungsarmgeglühten Proben im gleichen Streubereich lagen wie die Proben die im Schweißzustand belassen wurden. Daraus lässt sich ableiten, dass der wesentliche Parameter der ermüdungsfestigkeitssteigernden Wirkung der HFH-Verfahren der verbesserte Eigenspannungszustand ist. [99]

Randschichtverfestigung. Durch die mechanischen Impulse auf der Nahtübergangsoberfläche kommt es zu einer deutlichen Randschichtverfestigung im nachbehandelten Bereich. Die Verfestigung konnte im Rahmen von Untersuchungen zum Eigenspannungsabbau in Weich [99] nachgewiesen werden. Eigenspannungsmessungen haben gezeigt, dass bei einem S355J2 „im Bereich der behandelten Zone eine um 25% erhöhte Randstreckgrenze bzw. eine um 75 % erhöhte Randstauchgrenze“ vorlag. [99] Die lokal erhöhten Randschichtfestigkeiten führten zu einer verbesserten zyklischen Streckgrenze, so dass vornehmlich die Rissinitiationsphase verzögert wird.

Die Kombination der beschriebenen Wirkungsweisen resultiert in eine Ermüdungsfestigkeitssteigerung für geeignete Schweißnähte und führt dazu, dass vornehmlich die Phase bis zum Ermüdungsanriss deutlich verlängert wird. Dahingegen hat die HFH-Behandlung auf die Geschwindigkeit des Risswachstums keinen Einfluss, [44].

2.3 Vorstellung der betrachteten und angewandten HFH-Verfahren

2.3 Introduction of investigated and applied HFMI-methods

2.3.1 Allgemeines

2.3.1 General

Die in diesem Forschungsprojekt untersuchten Verfahren beschränken sich auf die beiden in Deutschland am meisten verbreiteten Verfahren PIT (Pneumatic Impact Treatment) der Firma *Pitec GmbH* und HiFIT (High Frequency Impact Treatment), das von der Firma *DYNATEC GmbH* vertrieben wird. Bei vielen vorhergehenden Untersuchungen wurde das UIT (Ultrasonic Impact Treatment) Verfahren angewandt, das über die Firma *Applied Ultrasonics / Esonix* vertrieben wird.

2.3.2 Vorstellung UIT-Verfahren

2.3.2 Introduction of UIT-treatment

Das **Ultrasonic Impact Treatment (UIT)** Verfahren basiert entgegen den beiden andern Verfahren auf einem ultraschallbetriebenen Gerät und geht der Entwicklung der andern beiden vorgestellten Verfahren voraus. Es wurde in den 70er Jahren in der Sowjetunion für die Marine-schiffahrt von Statnikov [86] entwickelt, mit dem Ziel „Schrumpfungen nach dem Schweißen zu kompensieren“ [32] und „die Zugspannungen durch Druckspannungen zu ersetzen durch Ultraschall Relaxation und Reduzierung des Verformungswiderstandes“ [32].

Neben einer typischen UIT-Behandlungsspur ist in Abbildung 2-6 die UIT-Ausrüstung, bestehend aus einem Handgerät, einem Ultraschall-Generator und einem Kühlaggregat dargestellt. Anfängliche Vorbehalte gegenüber möglicher negativer Auswirkungen durch eingebrachte Ultraschallwellen in das Bauteil, konnten durch gezielte Untersuchungen in Weich [99] ausgeschlossen werden. Ein Vergleich der Eigenspannungsmessungen nachbehandelter WIG-geschweißter Proben konnte zeigen, dass sich die Eigenspannungsmessungen der mit HiFIT-nachbehandelten von der mit UIT-nachbehandelten Probe nicht signifikant unterschieden.

Tabelle 1: Übliche Einstellungen für UIT-Anwendung auf Baustahl

Table 1: Typical settings for UIT-application on structural steel

Geräteeinstellungen		Bolzenform	
Ultraschall-Frequenz	Ca. 27 – 36 kHz	Pinanzahl	3
Mechanische Frequenz	Ca. 200 Hz	Pin Durchmesser	3 mm

2.3.3 Vorstellung HiFIT-Verfahren

2.3.3 Introduction of HiFIT-treatment

Das HiFIT-Verfahren (HiFIT steht für **H**igh **F**requency **I**mpact **T**reatment) ist ein mit Druckluft arbeitendes höherfrequentes Hämmerverfahren. Es wird zur Nachbehandlung von Schweißnahtübergängen eingesetzt, um die Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen zu steigern. Das HiFIT-Gerät sowie die einzelnen Komponenten sind in Abbildung 2-5 und Abbildung

2-7 dargestellt. Die direkt am Gerät stufenlos einstellbare Intensität der Schlagkraft kann durch Prüfung der Eindringtiefe mit einer im Lieferumfang enthaltenen Lehre auf den jeweiligen Werkstoff abgestimmt werden, siehe Abbildung 2-5. Der Durchmesser an der Spitze des gehärteten Standard-Pins beträgt 3,0 mm, wobei verfügbare Pins im Durchmesserbereich von 3 mm bis 11 mm erhältlich sind. Des Weiteren sind Sonderformen möglich. Für eine optimale Handhabung und Zugänglichkeit ist das Gerät leicht und kompakt konstruiert. Für den Betrieb ist lediglich eine Druckluftversorgung erforderlich. Das HiFIT-Verfahren wurde von der *DYNA-TEC Gesellschaft für CAE und Dynamik mbH* entwickelt und wird derzeit von der *HiFIT Vertriebs GmbH* vertrieben. Geeignete Einstellparameter und Einstellbereiche sind in Tabelle 2 angegeben.

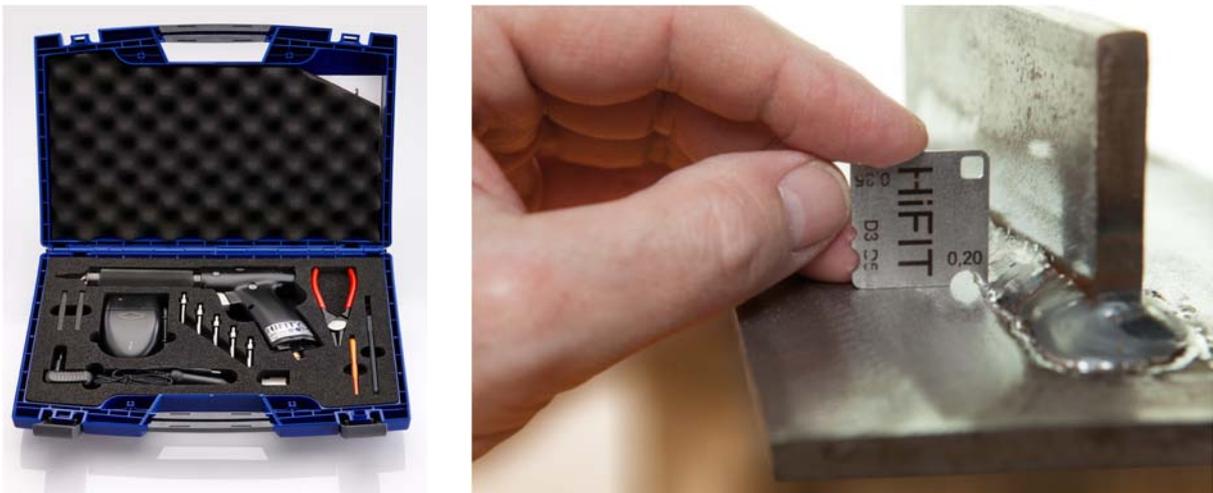


Abbildung 2-5: HiFIT-Gerät (Bildquelle: HiFIT Vertriebs GmbH) und Kontrolle der Eindringtiefe mit Lehre nach [68], (Bildquelle: HiFIT Vertriebs GmbH)

Figure 2-5: HiFIT device (picture source: HiFIT Vertriebs GmbH) and measurement of depth of indentation with gauge acc. to [68], (picture source: HiFIT Vertriebs GmbH)

Tabelle 2: Einstellmöglichkeiten des HiFIT-Geräts

Table 2: Adjustment possibilities for HiFIT-device

Versorgungsluftdruck [bar]	6 - 8
Schlagfrequenz [Hz]	180 - 300
Vorschub [mm/s]	Handgeführt bis zu 10 mm/s
Pindurchmesser [mm]	3 - 11
Pin [mm]	Kugelspitze in verschiedenen Durchmessern

2.3.4 Vorstellung PIT-Verfahren

2.3.4 Introduction of PIT-treatment

Das **P**neumatic **I**mpact **T**reatment (PIT) zählt zu den mit Luftdruck betriebenen höherfrequenten Hämmerverfahren. Hierbei treibt ein druckluftgesteuerter „Muskel“ mit bis zu 6 bar den gehärteten Bolzen auf das Material. Die dadurch erzeugten mechanischen Impulse mit einer Frequenz von bis zu 120 Hz bewirken plastische Verformungen auf der Oberfläche des Werkstoffs. Ein integriertes Federsystem sorgt zum einen dafür, dass die Anwendung unabhängig von der

Anpresskraft und somit vom Bediener bleibt. Zum andern führt es zu einer bedienerfreundlichen Anwendung, da die Schlagkraft dadurch vom Handgerät entkoppelt wird. Die Einstellungen lassen sich voneinander unabhängig und stufenlos regulieren. Das Handgerät mit zugehöriger Steuereinheit sind in Abbildung 2-8 dargestellt. Außerdem wird die typische PIT-Nachbehandlungsspur auf einem Schweißnahtübergang gezeigt. Ähnlich der UIT-Behandlungsspur, lassen sich bei der PIT-Spur einzelne Pineindrücke feststellen.



Abbildung 2-6: UIT-Ausrüstung [30] und zugehörige Nachbehandlungsspur aus [99]

Figure 2-6: UIT-device [30] and corresponding treatment track from [99]



Abbildung 2-7: HiFIT-Handgerät [50] und zugehörige Nachbehandlungsspur am S355

Figure 2-7: HiFIT-device [50] and corresponding treatment track on S355



Abbildung 2-8: PIT-Ausrüstung [79] und zugehörige Nachbehandlungsspur am S355

Figure 2-8: PIT-device [79] and corresponding treatment track on S355

Tabelle 3 können die Einstellungen hinsichtlich des Geräts und geometrische Angaben zum Pin entnommen werden. Weitere Informationen können [36] und [79] entnommen werden.

Tabelle 3: Übliche Einstellungen für PIT-Anwendung auf Baustahl

Table 3: Typical settings for PIT-application on structural steel

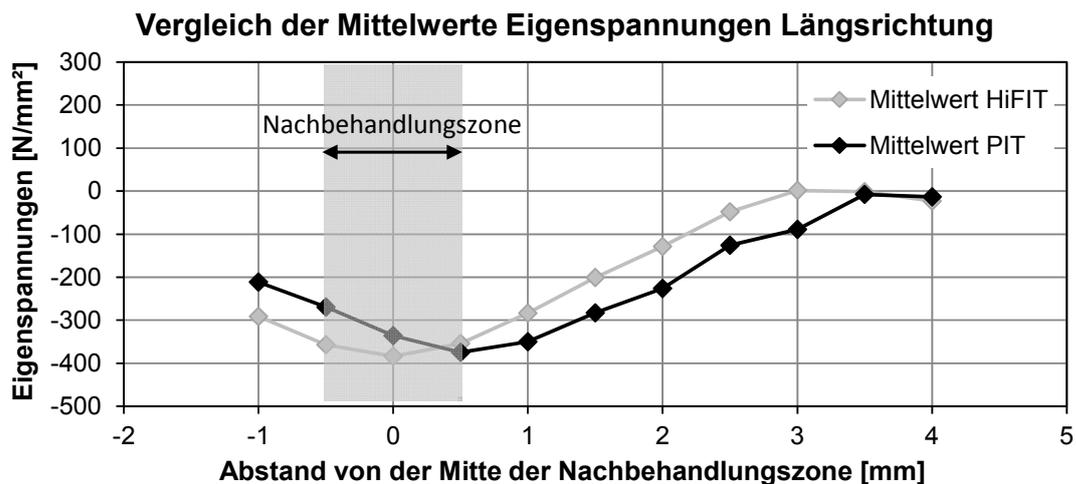
Geräteeinstellungen		Bolzen- und Pinform	
Frequenz	Stufe 2 (90Hz)	Pin-Durchmesser	
Vorschubgeschwindigkeit	ca. 20cm/min	Bolzenform	1,5 -4 mm
Versorgungsluftdruck	6 bar	Bolzenradius	2 mm

2.3.5 Vergleichbarkeit der HFH-Verfahren

2.3.5 Comparison of HFMI-treatment methods

Aufgrund der derzeit drei verschiedenen auf dem Markt vertretenen HFH-Verfahren, stellt sich die Frage nach der Vergleichbarkeit deren Wirkungsweise und deren Effektivität.

Innerhalb des BAW-Projekts [61] wurden das PIT-Verfahren und das HiFIT-Verfahren am Detail der unbelasteten Quersteife gleichermaßen eingesetzt. Ziel der Untersuchungen war es die Wirksamkeit beider Verfahren am S235, der üblicherweise in Bestandsbauwerken des Stahlwasserbaus verbaut ist, zu prüfen. Dazu wurden zunächst Eigenspannungsmessungen an der Oberfläche der nachbehandelten Prüfstücke durchgeführt, um die Wirkungsweise der beiden Verfahren gegenüberzustellen. Hierbei hat sich herausgestellt, dass für beide Verfahren in Anbetracht der üblichen Streubreite von Eigenspannungsmessungen, der Mittelwert aus jeweils drei Messungen zu ähnlichen Messergebnissen führten, siehe Abbildung 2-9. Das gilt sowohl für die Eigenspannungen in Längs- als auch in Querrichtung auf der Oberfläche.



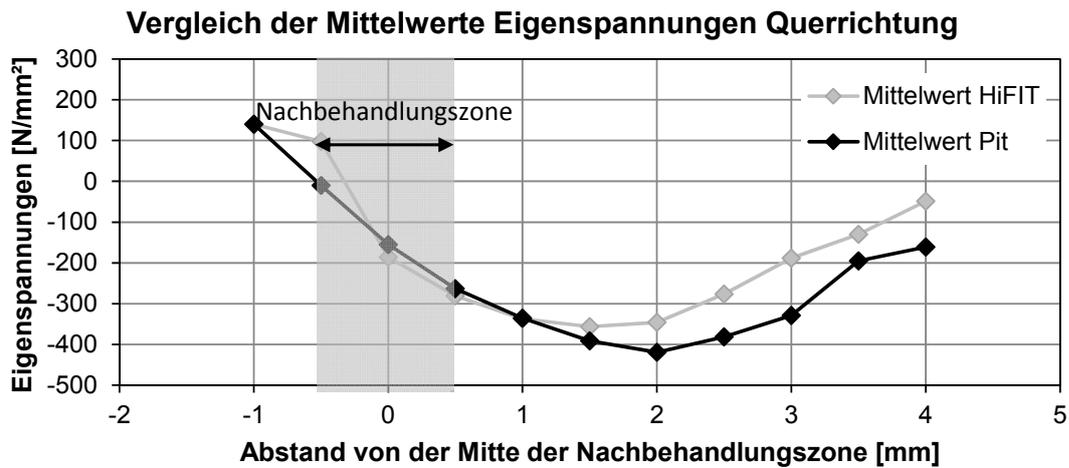


Abbildung 2-9: Vergleich der Mittelwerte der Eigenspannungsmessungen an der Oberfläche des S235 aus [61]

Figure 2-9: Comparison of mean values of residual stress measurements at surface of S235 from [61]

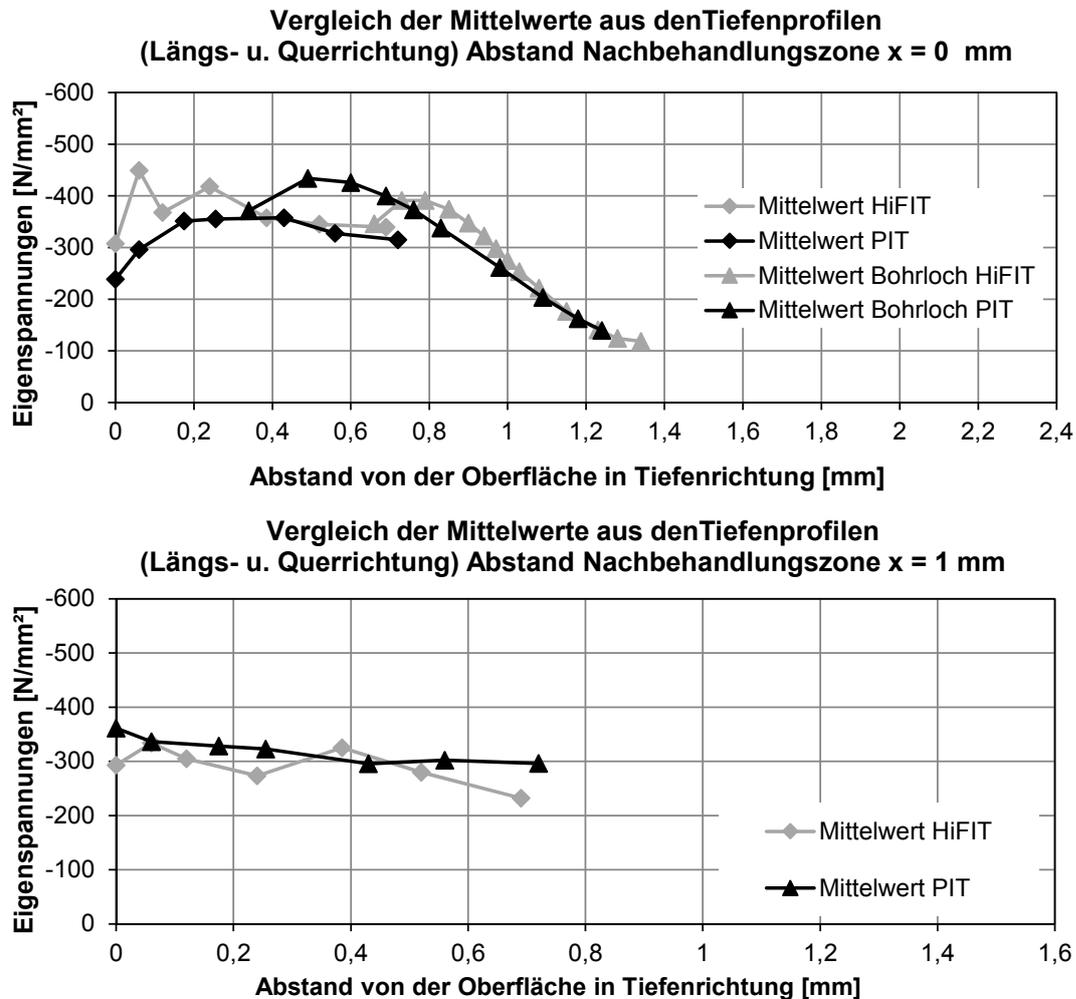


Abbildung 2-10: Vergleich der Mittelwerte der Eigenspannungsmessungen in die Tiefe des S235 aus [61]

Figure 2-10: Comparison of mean values of residual stress measurements in depth of S235 from [61]

In einem zweiten Schritt wurden Tiefenprofile der Eigenspannungen am nachbehandelten Nahtübergang erstellt, um zu überprüfen, ob sich die Tiefenwirkung der beiden Verfahren ähnelt. Dies war durch eine Kombination aus schrittweise elektrolytischen Abtragen und anschließender Messung durch Röntgendiffraktometrie möglich. Da diese Messmethode nur bis in eine gewisse Tiefe sinnvoll ist, wurden ab einem Bereich von ca. 0,4 mm bis in weitere Tiefen die Messungen mit der Bohrlochmethode durchgeführt. Die Messungen wurden sowohl direkt in der Nachbehandlungszone, als auch 1 mm neben der Behandlungszone durchgeführt. Wie auch bei den vorhergehenden Eigenspannungsdiagrammen sind die Mittelwerte der jeweils drei Messergebnisse in Abbildung 2-10 dargestellt. Auch für das Tiefenprofil der Eigenspannungen lässt sich für die beiden gewählten Abstände eine gute Übereinstimmung feststellen.

Letztendlich wurde eine sehr gute Übereinstimmung der Effektivität beider Verfahren durch ein Versuchsprogramm bestehend aus 70 Ermüdungsversuchen bestätigt. Deshalb wurden die Versuchsserien in [61] gemeinsam statistisch ausgewertet.

In Weich [99] wurde die Übereinstimmung der Anwendung des UIT-Verfahrens mit dem HiFIT-Verfahren durch statistische Auswertung experimenteller Versuche am Stumpfstoß abgeleitet. Es ist davon auszugehen, dass sich die Vergleichbarkeit der Verfahren auch auf andere Konstruktionsdetails übertragen lässt.

Folglich ist die Vergleichbarkeit der Anwendung der drei Verfahren durch Versuchsserien bestätigt worden, so dass aus Sicht der Autoren alle drei Verfahren für den Bemessungsvorschlag herangezogen werden können.

3 Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeitssteigerung durch Anwendung der Höherfrequenten Hämmerverfahren

3 Influences on the improvement of fatigue strength with application of High Frequency Mechanical Impact treatments

Kurzfassung

Dieses Kapitel widmet sich den Parametern, die die Wirksamkeit der Höherfrequenten Hämmerverfahren beeinflussen. Zum einen wird auf ermüdungsfestigkeitsbeeinflussende Faktoren im Allgemeinen eingegangen und gleichzeitig die Unterschiede oder Analogien zum HFH-nachbehandelten Zustand beschrieben.

Aus den offenen Parametern, zu denen es bisher keine fundierten oder nur stichpunktartig belegte Untersuchungen gibt, wird ein umfassendes Versuchsprogramm am Konstruktionsdetail der unbelasteten Quersteife im Rahmen dieses Forschungsprojekt abgeleitet. Die durchgeführten Versuchsserien werden im Einzelnen beschrieben und die Fertigung und Nachbehandlung werden dokumentiert. Neben der Darstellung der Durchführung der Versuchsserien werden die Ergebnisse je Versuchsserie gezeigt. Im Anschluss finden eine Ergebnisbewertung sowie eine Interpretation dieser Ergebnisse auf Grundlage der statistischen Auswertung mittels linearer Regression statt.

Abstract

This chapter pursues the parameters, which influence the effectiveness of high frequency mechanical impact treatments. On one side the fatigue strength influencing factors are mentioned in general as well as the differences or analogies to the HFMI-post-treated condition are described.

Within this research project a comprehensive test program on the construction detail of an unloaded transverse stiffener is derived from the open parameters of which no valid or only in abbreviated form proved investigations exist. The implemented test series are described in detail and the production and post-weld treatment are documented. Beneath the presentation of the implementation of the test series the results of each test series are shown. Following the evaluation of results as well as the interpretation of these results on base of the statistical evaluation by linear regression takes place.

3.1 Allgemeines

3.1 General

Mithilfe von experimentellen Untersuchungen sollen offene Fragen hinsichtlich verschiedener Einflüsse auf die Wirksamkeit der HFH-Nachbehandlung geklärt werden, um ein abgesichertes Bemessungskonzept entwickeln zu können. Lücken bisheriger Untersuchungen sollen gefüllt und so abschließend Einflussparameter und Anwendungsgrenzen beurteilt werden.

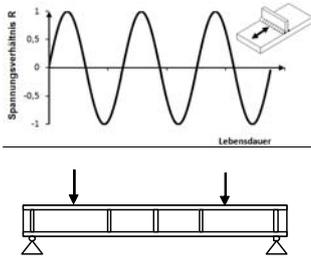
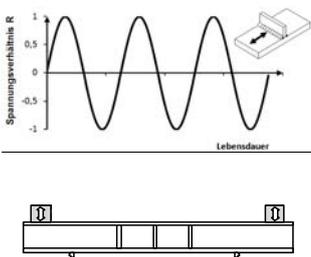
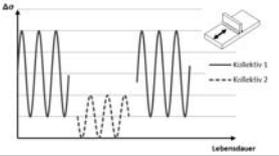
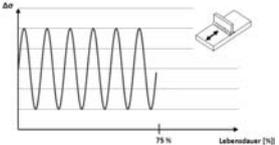
3.1.1 Versuchsprogramm

3.1.1 Test program

Das Versuchsprogramm besteht aus Kleinprüfkörperversuchen und aus Bauteilversuchen, im Folgenden mit Trägerversuchen bezeichnet. Zu Beginn des Projekts wird entschieden, das Versuchsprogramm um 4 Trägerversuche sowie um 64 Kleinprüfkörperversuche zu erweitern. Diese Maßnahme hat eine Projektverlängerung zur Folge, erhöht jedoch die Aussagekraft der einzelnen Versuchsserien erheblich. Tabelle 4 zeigt das erweiterte Versuchsprogramm mit insgesamt 24 Trägerversuchen und 110 Kleinkörperversuchen sowie die durchführende Forschungsstelle. Im Zuge der Erweiterung des Versuchsprogramms werden 8 der zusätzlichen Kleinprüfkörperversuche an Prüfkörpern mit variierter Nachbehandlungsintensität durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden aufgrund der wissenschaftlichen Relevanz ebenfalls im Rahmen des parallel laufenden FOSTA Projekts [91] zur Qualitätssicherung höherfrequenter Hämmerverfahren verwendet.

Tabelle 4: Versuchsprogramm

Table 4: Test program

Effekt	Art	Zustand	Anzahl	FS
Bauteileinfluss 	Kleinversuche	aw	0	KIT
		HiFIT	0	KIT
		PIT	0	KIT
	Trägerversuche	aw	2	KE
		HiFIT	8	KE
		PIT	8	KE
Mittelspannungseinfluss 	Kleinversuche	aw	8	KIT
		HiFIT	6	KIT
		PIT	6	KIT
	Trägerversuche	aw	2	KE
		HiFIT	2	KE
		PIT	2	KE
Einfluss mehrstufiger Belastung 	Kleinversuche	aw	24	KIT
		HiFIT	18	KIT
		PIT	18	KIT
Einfluss durch Vorbelastung 	Kleinversuche	aw	8	KIT
		HiFIT	6	KIT
		PIT	6	KIT

3.2 Statistische Auswertung der Ermüdungsversuche

3.2 Statistical evaluation of fatigue tests

Die statistische Auswertung der Ermüdungsversuche erfolgt gemäß Hintergrunddokument [84] zu EN 1993-1-9 [16]. Mithilfe der Auswerteverfahren nach [84] werden mittels linearer Regression die charakteristischen Bezugswerte der Spannungsschwingbreite bei 2 Millionen Lastwechsel für den Mittelwert und die 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit der Serien bestimmt. Für die Auswertung wurde das sogenannte Prognose- oder auch Vorhersageintervall genutzt, das berücksichtigt, dass eine Aussage für einen zukünftigen Wert getroffen werden soll, [33].

Die Vorgehensweise und zugehörigen Formeln sind in Anhang E beschrieben. Dabei wird unterschieden in Auswertung einer Serie mit freier Wöhlerlinienneigung m_{frei} oder fixer, also vorgegebener Wöhlerlinienneigung m_{fix} . Im Falle von unbehandelten Kerbdetails wird die fixe Wöhlerlinienneigung zu $m_{\text{fix}} = 3$ gewählt, bei HFH-behandelten Kerbdetails wird eine fixe Neigung von $m_{\text{fix}} = 5$ angenommen.

Zwar ist die statistische Auswertung zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit mittels linearer Regression von Ermüdungsversuchen nach Hintergrunddokument [84] derzeit in der Diskussion, dennoch konnte bisher keine verbesserte Auswertemethodik verabschiedet werden. Eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Regelwerke von Euler et al. [33] hat gezeigt, dass in den Regelwerken unterschiedliche statistische Intervalle zu Grunde liegen, was in der Folge zu unterschiedlichen Ermüdungsfestigkeitswerten führt. Es besteht Handlungsbedarf bei der Klärung bzw. einer Vereinheitlichung und Berichtigung der Intervalle und Auswertemethodik. Ein aktuelles Forschungsprojekt zu diesem Thema [35] widmet sich unter anderem der Verbesserung und Vereinheitlichung der Auswertemethodik für die künftige Bestimmung der Ermüdungsfestigkeitswerte durch Ermüdungsversuche.

3.3 Auswertung einzelner Einflussgrößen

3.3 Evaluation of single influencing effects

Prinzipiell werden die einzelnen Einflüsse, wie beispielsweise Mittelspannungseinfluss, Blechdickeneinfluss oder Streckgrenzeinfluss auf die ermüdungsfestigkeitssteigernde Wirkung getrennt betrachtet.

Dies kann durchgeführt werden, indem nur Versuchsdaten miteinander verglichen werden, die den gleichen Bedingungen zugrunde liegen. Das kann zur Folge haben, dass nur wenige Versuchsdaten zur Verfügung stehen. Auf der anderen Seite kann man die Versuchsdaten hinsichtlich nicht betrachteter Einflüsse korrigieren, so dass eine größere Grundgesamtheit an Daten zum Vergleich zur Verfügung steht. Hierzu müssen im Vorfeld Annahmen zu den nicht betrachteten Einflussgrößen getroffen werden, die eventuell nicht eingehalten sind.

Im Rahmen dieses Projekts hat man sich für die erste Variante entschlossen, also keine Korrekturen von einzelnen Einflussfaktoren anzuwenden.

3.4 Bauteileinfluss

3.4 Size effect

3.4.1 Allgemeines

3.4.1 General

Unter dem Begriff Bauteileinfluss, Blechdickeneinfluss, Größeneinfluss oder Maßstabeffekt versteht man im Stahlbau meist die Kombination aus mehreren Effekten die sich bei realen geschweißten großformatigen Bauteilen gegenüber Kleinbauteilen, wie sie für Versuchsreihen, speziell bei Ermüdungsversuchen meist verwendet werden, ergeben. Im Folgenden sind die drei wesentlichen beeinflussenden Effekte aufgeschlüsselt, die auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sind.



Abbildung 3-1: Spezifizierung des Größeneinflusses, Darstellung aus [3]

Figure 3-1: Specification of the size effect, illustration from [3]

Statistischer Größeneinfluss. Der statistische Größeneinfluss auf die Festigkeit eines Materials resultiert aus der höheren Imperfektions- und Fehleranzahl bei größerem Materialvolumen. Diesen Bezug zwischen höherer Fehlerwahrscheinlichkeit bei größer werdendem Materialquerschnitts hat Weibull bereits 1939 in [97] hergestellt und diesen „Volumeneffekt“ mithilfe der Gleichung (3.1) beschrieben. Heckel und Köhler [48] haben dieses Verhalten in Schwingversuchen unter Zug-Druckbeanspruchung 1975 auch für ermüdungsbeanspruchte Konstruktionen an ungerbten Stabproben bestätigt. In [32] wurde ausgehend von den Untersuchungen in [97] und [48] der Effekt entsprechend auf die Ermüdungsfestigkeit angewandt und mit Gleichung (3.2) formuliert.

$$\sigma/\sigma_o = (V_o/V)^k \quad (3.1)$$

$$\Delta\sigma/\Delta\sigma_o = (t_o/t)^{0,102} \quad (3.2)$$

Es sei angemerkt, dass sich das Volumen nicht nur auf die Querschnittsfläche sondern ebenso auf die Länge des Prüfstücks bezieht.

Der **fertigungstechnische oder auch technologische Größeneinfluss** resultiert aus dem Zusammenbauprozess einer geschweißten Stahlkonstruktion. Durch das Verschweißen einzelner Bleche zu größeren, komplexen Bauteilen ergeben sich weitaus größere Zwangsbeanspruchungen aus Schrumpfungsbehinderungen durch Abkühlprozesse als bei einfachen Bauteilen, beispielweise Kleinversuchsreihen. So entstehen z.B. ungewünschte Beanspruchungen aus der Fertigung mehrlagiger Schweißnähte mit großem Schweißnahtvolumen, die durch komplexere Abkühlprozesse zu Verzug führen können, oder durch Schweißen in Zwangslagen, oder aber aus dem Zusammenschweißen bereits steifer Einzelbauteile, die zu einer großen Gesamtheit zusammengebaut werden müssen, [49]. Der Aufbau zusätzlicher innerer Spannungen, den sogenannten Eigenspannungen, führt mit den äußeren, aufgetragenen Beanspruchungen insgesamt zu einer ungünstigeren Beanspruchung, die in einer kürzeren Lebensdauer resultieren.

Spannungsmechanischer Größeneinfluss oder Einfluss der Spannungsgradienten. Bei dickeren Blechen (t_2) ergeben sich durch flachere Spannungsgradienten aufgrund der größeren

Querschnittshöhe höhere Spannungen (σ_2) in der randnahen Umgebung als bei dünnen Blechen (t_1), wo der Spannungsgradient sehr steil abfällt, siehe Abbildung 3-2 aus [74]. Das bedeutet, dass der Querschnitt dickerer Strukturen prinzipiell in weiteren Teilen höher beansprucht ist, als dünne Bleche. In Kombination mit Anrissen (a_i) oder Mikrorissen ergeben sich dadurch bei dickeren Blechen geringere Lebensdauern als bei dünneren Blechen mit geringeren Spannungswerten. Ein zusätzlicher Effekt, ist die höhere Spannungskonzentration bei größeren Blechdicken. Diesen Umstand hat bereits Örjasäter in [78] beschrieben.

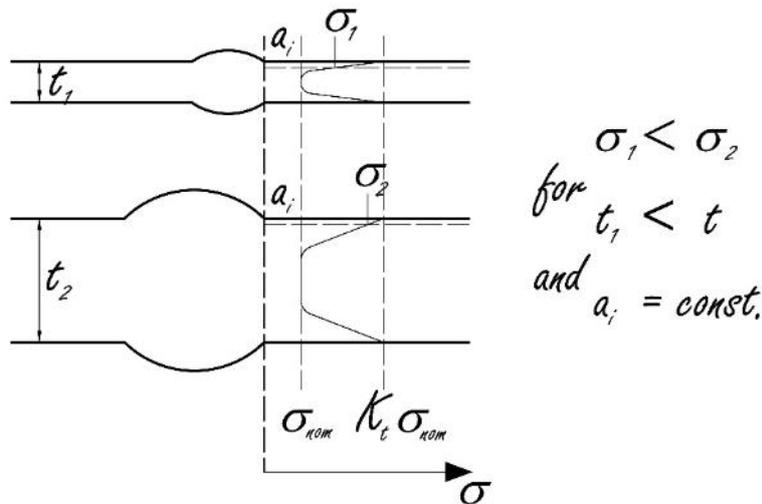


Abbildung 3-2: Darstellung des spannungsmechanischen Größeneinflusses nach [78]

Figure 3-2: Schematic view of size effect due to stress gradient effects nach [78]

		Spannungsmechanischer Größeneinfluss	Statistischer Größeneinfluss	Fertigungsmechanischer Größeneinfluss
Kleinversuchskörper				
Kleinversuchskörper mit dickerem Grundblech		X	X	X
Kleinversuchskörper mit dickeren Attachment		X	X	X
Trägerversuch			X	X

Abbildung 3-3: Zuordnung verschiedener Versuchstypen auf Arten der Größeneinflüsse am Beispiel unbelastete Quersteife [3]

Figure 3-3: Allocation of the different variations to types of size effects by the example of unloaded transverse stiffener [3]

Die drei beschriebenen Effekte tragen insgesamt zur Abminderung der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Kerbdetails bei, die bei der Bemessung oder durch das Sicherheitskonzept Berücksichtigung finden sollten. Abbildung 3-3 zeigt den Versuch einer Zuordnung von Versuchstypen zur Analyse der jeweiligen Größeneffekte. Eine detailliertere Zuordnung findet sich in [3].

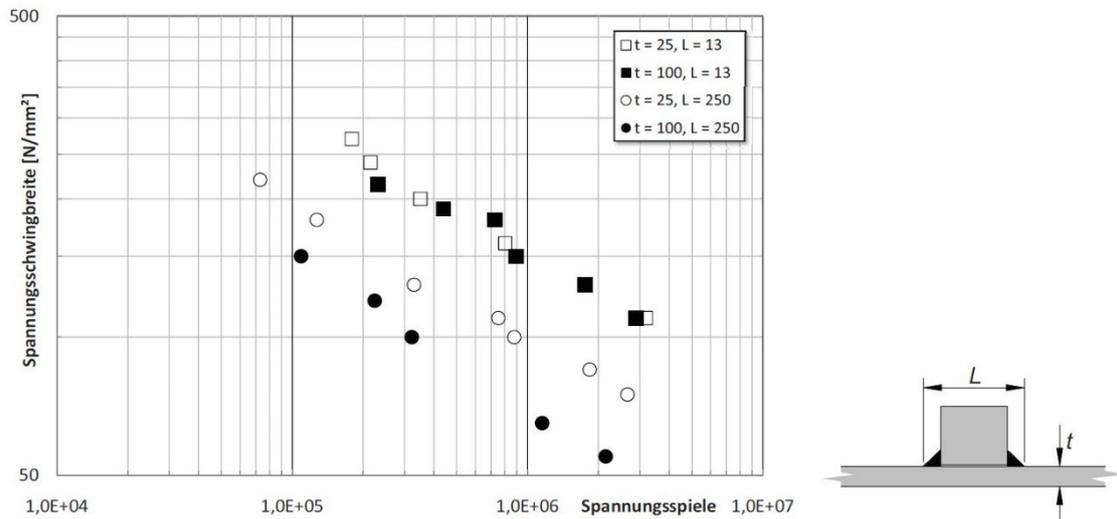


Abbildung 3-4: Auswertung aus [55] zu Schwingversuche für unterschiedliche Queranschlüsse aus Gurney [42]

Figure 3-4: Evaluation of [55] regarding to fatigue tests for different transverse welded joints from Gurney [42]

Welche Abmessungen des Anschlusses den Größeneinfluss beschreiben sowie der Schweregrad des Größeneinflusses ist je nach Konstruktionsdetail unterschiedlich. Im Folgenden wird exemplarisch das Detail der mit Kehlnähten aufgeschweißten Quersteife betrachtet. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Weiterentwicklung und Spezifizierung von Straßenbrücken“ [55] wurden die Untersuchungen nach Gurney [42] für die Quersteife aufbereitet und analysiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

Durch die Aufarbeitung der Versuchsergebnisse von [42] in [55] wird deutlich, dass erst bei steigendem, also größerem, Abstand der Nahtübergänge ($L = 250$ mm) ein Einfluss der Grundblechdicke t auf die Ermüdungsfestigkeit des Details der Quersteife besteht. Dagegen ist bei einem Nahtübergangsabstand von 13 mm noch kein Effekt auf die Ermüdungsfestigkeit durch die Grundblechdicke zu erkennen.

3.4.2 Berücksichtigung des Blechdickeneffekts nach DIN EN 1993-1-9 [16]

3.4.2 Consideration of plate thickness effects according to DIN EN 1993-1-9 [16]

Nach Eurocode EN 1993-1-9 [16] werden die Einflüsse auf geschweißte Kerbdetails der Kerbfalltabellen für Blechdickenabhängigkeiten ab Grundblechdicken $t > 25$ mm mit dem in Gleichung (3.4) beschriebenen Abminderungsfaktor k_s berücksichtigt. Durch Multiplikation des Abminderungsfaktors k_s mit der Kerbfallspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_c$ des Referenzblechs ($t = 25$ mm) wird die reduzierte Spannungsschwingbreite für das Detail mit Blechdicken $t > 25$ mm bestimmt, siehe Gleichung (3.3).

$$\Delta\sigma_{C,red} = k_s \Delta\sigma_C \quad (3.3)$$

$$k_s = (25/t)^{0,2} \quad \text{für } t > 25 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Bei aufgeschweißten Blechen deren Schweißnaht quer zur Naht beansprucht ist berücksichtigt DIN EN 1993-1-9 [16] durch Abstufung einen Abfall der Ermüdungsfestigkeit infolge wachsender Abstände der Schweißnahtübergangsfußpunkte.

Für längs zur Beanspruchungsrichtung ausgerichtete, aufgeschweißte Bauteile findet in Abhängigkeit der Länge des aufgeschweißten Bauteils eine Abstufung zur dadurch verursachten Abminderung der Ermüdungsfestigkeit statt.

Im Unterschied zu den IIW-Richtlinien [51] ist in DIN EN 1993-1-9 [16] die Angabe zur Berücksichtigung des Größeneinflusses für einzelne Kerbdetails im Kerbfallkatalog angegeben und wird nicht pauschal auf jedes Kerbdetail angewandt. Es wird also für jedes Konstruktionsdetail unterschieden welche Einflüsse aus geometrischen Abmessungen Berücksichtigung finden.

Von den in diesem Projekt betrachteten Kerbdetails erfährt lediglich das geschweißte Detail der querbelasteten Stumpfnaht eine Abminderung der Ermüdungsfestigkeit bei steigender Blechdicke in DIN EN 1993-1-9 [16], siehe Abbildung 3-5. So finden die Gleichungen (3.3) und (3.4) Anwendung bei Blechdicken $t > 25$ mm.

Die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ der unbelasteten Quersteife wird gemäß DIN EN 1993-1-9 [16] durch steigende Basisblechdicken t_b nicht beeinflusst. Jedoch durch den Abstand der Schweißnahtübergänge L , so wird mit steigender Distanz der Schweißnahtübergänge die Ermüdungsfestigkeit abgemindert, siehe Abbildung 3-7.

Ein Einfluss durch steigende Abmessungen wird auch bei der unbelasteten Längssteife durch die Norm berücksichtigt, siehe Abbildung 3-6. Leichte Abweichungen ergeben sich gegenüber den IIW-Empfehlungen für geschweißter Bauteile [51], hier gibt es für die Längssteife eine weitere Kerbfallklasse 50 für Längen $L > 300$ mm.

90	Blechdickenabhängigkeit für $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0,2}$		5) Querstöße von Blechen oder Flachstählen. 6) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten ohne Freischnitte. 7) Querstöße von Blechen oder Flachstählen, abgeschragt in Breite oder Dicke mit einer Neigung $\le 1/4$. Der Übergang muss kerbfrei ausgeführt werden.	<ul style="list-style-type: none"> - Die Nahtüberhöhung muss ≤ 10 % der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden. - Schweißnaht- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen. Blechränder sind blechen in Lastrichtung zu schleifen. - Beidseitige Schweißung mit ZFP. <p><u>Kerbfälle 5 und 7:</u> Die Nähte sind in Wannenlage zu schweißen.</p>
----	--	--	--	--

Abbildung 3-5: Auszug des Kerbfalls querbelasteter Stumpfstoß aus DIN EN 1993-1-9 [16] Tab. 8.3

Figure 3-5: Extract of the fatigue detail category of cross-loaded butt joint from DIN EN 1993-1-9 [16] Tab. 8.3

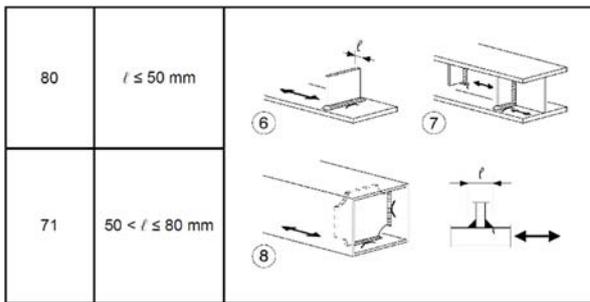


Abbildung 3-6: Auszug der Kerbfälle unbelastete Quersteife in Abhängigkeit des Schweißnahtübergangsabstands aus DIN EN 1993-1-9 [16]

Figure 3-6: Extract of the fatigue detail category unloaded transverse stiffener depending on the transition gap of the weld from DIN EN 1993-1-9 [16]

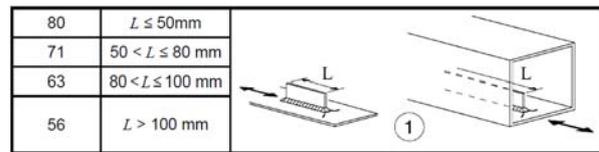


Abbildung 3-7: Auszug der Kerbfälle unbelastete Längssteife in Abhängigkeit der Steifenlänge aus DIN EN 1993-1-9 [16]

Figure 3-7: Extract of the fatigue detail category unloaded longitudinal stiffeners depending on the longitude of the stiffener from DIN EN 1993-1-9 [16]

3.4.3 Aufarbeitung bisheriger Untersuchungen zum Größeneinfluss an HFH-nachbehandelten Konstruktionsdetails

3.4.3 Assessment of previous studies about the size effect on HFMI-treated construction details

Größeneinfluss.

Quersteife [30]. In Dürr [30] wurden unbehandelte und UIT-behandelte Quersteifen-Probekörper unterschiedlicher Stahlgüten (S355, S460 und S690) unter Variation der Prüfkörperbreite getestet. Durch anschließende statistische Auswertung der Serien hat sich gezeigt, dass sich für die breiteren (160 mm) unbehandelten Serien in Abhängigkeit der Stahlgüte eine 8 – 15 % geringere Ermüdungsfestigkeit ergeben haben, als bei der Referenzserie mit einer Probenbreite von 40 mm.

Dieser Einfluss hat sich für die HFH-nachbehandelten Serien aus S355 und S460 nicht bestätigt. Begründet wurde das prüfkörperbreitenunabhängige Verhalten durch die hohe Reproduzierbarkeit der UIT-Anwendung.

Blehdickeneinfluss.

Quersteife [30]. In Dürr [30] wurden Kleinprüfkörperserien am Detail der Quersteife mit zwei unterschiedlichen Blechdicken ($t = 12 \text{ mm}$ und $t = 25 \text{ mm}$) im unbehandelten und UIT-behandelten Zustand mit einander verglichen. Dabei hat sich für die unbehandelten Serien herausgestellt, dass die Ermüdungsfestigkeit der Serie mit Blechdicken $t = 25 \text{ mm}$ um 24% geringer war, als die mit 12 mm dicken Blechen. Dürr [30] begründet das zum einen mit der durch FE-Untersuchungen nachgewiesenen größeren Kerbwirkung bei Verwendung dickerer Bleche.

Für die UIT-nachbehandelten Serien konnte ein Einfluss aus dem Blechdickeneffekt beim Vergleich der Serien nicht bestätigt werden. Es kann sein, dass der Einfluss durch das Versagen im Grundmaterial der nachbehandelten Proben verfälscht wird.

Außerdem wurden in [99] Quersteifenproben für den Offshore-Bereich mit Blechdicken $t = 30 \text{ mm}$ aus S460 geprüft.

Stumpfstoß [99] [80]. In [99] wurden Stumpfstoßproben mit Blechdicken $t = 16$ mm geprüft. In [80] wurden für die experimentellen Untersuchungen am Stumpfstoß Blechdicken von $t = 30$ mm verwendet.

Experimentelle Untersuchungen nach Leitner et al [67] beschäftigen sich mit der Frage nach einem positiven Blechdickeneffekt bei dünnen Blechen. Hierfür wurden für die drei Konstruktionsdetails Quersteife, Stumpfstoß und Längssteife Versuchsserien mit Blechdicken $t = 5$ mm durchgeführt.

Die Gegenüberstellung der Serien mit unterschiedlichen Blechdicken folgt in Kapitel 5.3.4

Bauteileinfluss.

Quersteife unter Wechselbeanspruchung ($R = -1,0$). In Dürr [30] wurden sowohl für den unbehandelten, als auch für den UIT-behandelten Zustand Trägerversuche mit eingepasster Quersteifen unter Wechselbeanspruchung durchgeführt. Ein Vergleich der unbehandelten Trägerergebnisse mit den unbehandelten Kleinversuchsproben ergab eine Abminderung der Ermüdungsfestigkeit für die Trägerserie auf 79 % bezogen auf die unbehandelte Kleinserie.

Auch bei den Trägerversuchen konnte aufgrund des Versagens der Träger im Grundmaterialbereich eine Aussage nur auf der konservativen Seite liegend getroffen werden. Die Anwendung des UIT-Verfahrens führte somit zu einer Verbesserung von mindestens 21 % gegenüber den unbehandelten Trägerversuchen.

Quersteife unter Zugschwellbeanspruchung ($R = 0,5$). Ebenso wurden in [30] unbehandelte und UIT-behandelte Trägerversuche mit eingepasster Quersteife unter Zugschwellbeanspruchung mit $R = 0,5$ durchgeführt. Hier wurde in fast allen Fällen ein Versagen am Nahtübergang herbeigeführt, so dass für den unbehandelten Zustand eine Abminderung aufgrund des Bauteileinflusses von 16% und bei den UIT-behandelten Prüfkörpern ein eine Abminderung von 15 % gegenüber der Kleinserie ermittelt wurde.

3.4.4 Experimentelle Untersuchungen an Kleinprüfkörpern

3.4.4 Experimental Investigations on small scale specimens

3.4.4.1 Vorgehensweise

Zur Untersuchung und Quantifizierung der in Tabelle 4 dargestellten Einflüsse werden am KIT im Rahmen des Forschungsprojekts Ermüdungsversuche an Prüfkörpern im Zustand „wie geschweißt“ (aw) sowie im nachbehandelten Zustand (HiFIT/PIT) durchgeführt. Die Versuche an unbehandelten Prüfkörpern dienen als Referenz und ermöglichen die Beurteilung der Wirksamkeit einer Nachbehandlung für die jeweilige Serie und den jeweiligen Einfluss. Die experimentellen Untersuchungen werden aufgrund der baupraktischen Bedeutung sowie zur Ergänzung der im Rahmen des Projekts zu erstellenden Datenbank am Konstruktionsdetail der Quersteife durchgeführt. Für die Schweißnahtnachbehandlung kommen die höherfrequenten Hämmerverfahren (HFH-Verfahren) HiFIT und PIT zum Einsatz.

3.4.4.2 Werkstoffauswahl

Für die Kleinprüfkörper werden normalisierend gewalzte Bleche aus dem Werkstoff S355J2+N nach EN 10025-2 [22] und EN10025-1 [21] verwendet, die von der Fima voestalpine Grobblech GmbH hergestellt sind. Die nach EN 10025-2 [22] und EN10025-1 [21] geforderten mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Diese werden von den im Projekt

verwendeten Blechen eingehalten. Das Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach EN 10025-2 [22] und EN10025-1 [21] der Bleche ist im Anhang B gegeben.

Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften von warmgewalzten Erzeugnissen aus Baustählen nach EN 10025-2 [22] und EN10025-1 [21]

Table 5: Mechanical properties of hot rolled plates of structural steels according to EN 10025-2 [22] und EN10025-1 [21]

Werkstoff	Blechdicke t [mm]	Mechanische Eigenschaften					
		Streckgrenze		Zugfestigkeit		Bruch- dehnung	Kerbschlagarbeit (Prüftemp.: -20°C)
		R_{eH}		R_m		A	K_v
		[N/mm ²]		[N/mm ²]		[%]	[J]
		min.	max.	min.	max.	min.	min.
S355J2+N	12	355	-	490	630	20,0	21

3.4.4.3 Herstellung der Kleinprüfkörper

Die Kleinprüfkörper werden bei der Firma Eiffel Deutschland Stahltechnologie in Hannover gefertigt. Die Quersteifen werden mit dem MAG-Schweißverfahren (MAG 135) in Wannelage geschweißt. Nach dem Anheften der Quersteifen und dem Anbringen der An- und Auslaufbleche, siehe Abbildung 3-8 erfolgt das Schweißen der Kehlnähte beidseits der Steife mit dem Weldycar, siehe Abbildung 3-9. Die Schweißparameter und die einzelnen Fertigungsschritte sind in Anhang B im Detail dokumentiert.



Abbildung 3-8: Anheften der Steifen und Anbringen von An- und Auslaufblechen

Figure 3-8: Tacking of stiffeners and mounting of run-on and run-off plates



Abbildung 3-9: Paralleles Schweißen der Kehlnähte beidseits der Steife mit WeldyCar

Figure 3-9: Simultaneous welding of fillet welds on both sides of the stiffener with WeldyCar

Nach dem Anschweißen der ersten Steife, wird das gesamte Grundblech mit Steife um 180° gedreht und die zweite Steife analog zur ersten Steife angeschweißt. Insgesamt werden vier Großprüfkörper gefertigt und im Hinblick auf das Abtrennen der Kleinprüfkörper entsprechend Abbildung 3-9 nummeriert. Dadurch kann im Nachhinein festgestellt werden, aus welchem Großprüfkörper der jeweilige Kleinprüfkörper stammt. Die Kleinprüfkörper werden nach dem Abkühlen der Großprüfkörper (Abbildung 3-9) durch Sägeschnitte hergestellt. Die Abmessungen der Kleinprüfkörper sind in Abbildung 3-10 dargestellt.

Abbildung 3-11 zeigt die Kleinprüfkörper im Anlieferungszustand in der Ansicht sowie in der Draufsicht. Am KIT werden die Kleinprüfkörper vermessen und im Kantenbereich beschliffen, um einen Ermüdungsrissausgang im Ermüdungsversuch ausgehend von Riefen im Kantenbereich zu vermeiden.

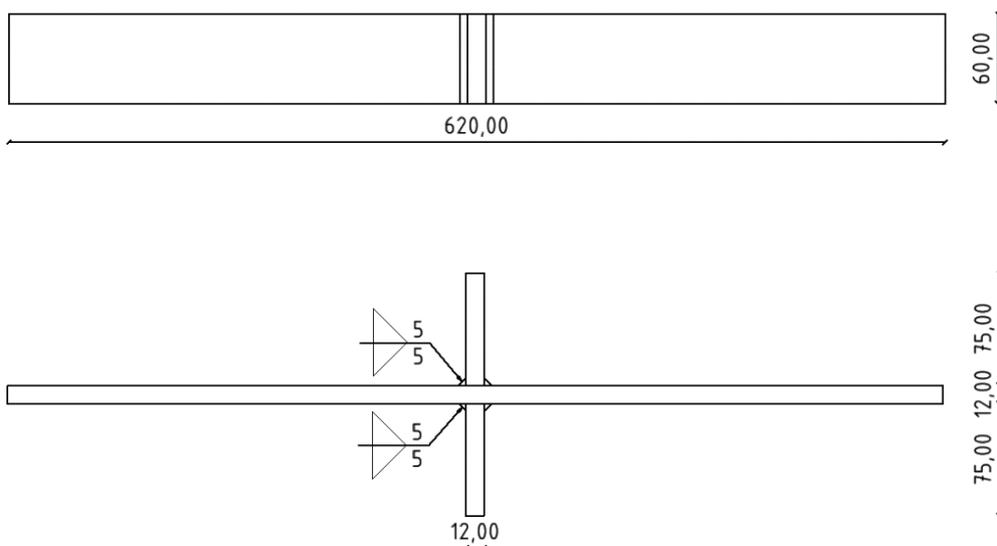


Abbildung 3-10: Abmessungen der Kleinprüfkörper

Figure 3-10: Dimensions of small scale specimens

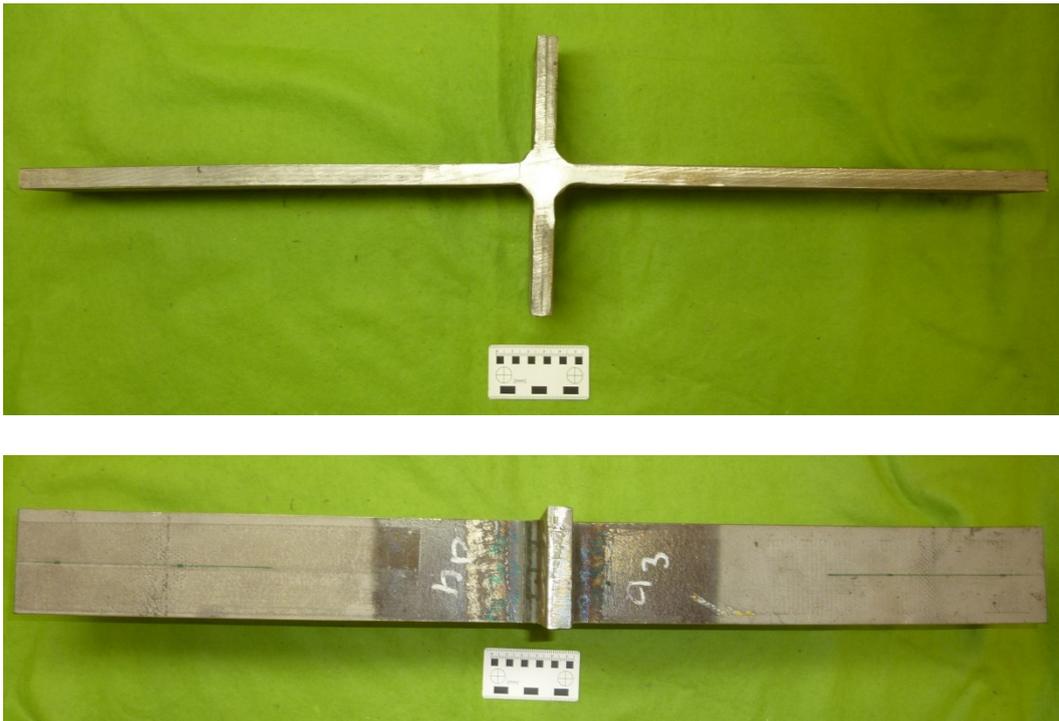


Abbildung 3-11: Kleinprüfkörper, Quersteife, S355J2+N, Ansicht (oben), Draufsicht (unten)

Figure 3-11: Small scale specimen, transverse attachment, S355J2+N, side view (upper picture), top view (lower picture)

3.4.4.4 HFH-Behandlung der Kleinprüfkörper

Kleinprüfkörper, die im HFH-behandelten Zustand im Ermüdungsversuch geprüft werden, werden von geschultem Fachpersonal der Gerätehersteller nachbehandelt. Die Geräteeinstellungen und Nachbehandlungsparameter für beide HFH-Verfahren sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: HFH-Behandlung: Geräteeinstellungen und Nachbehandlungsparameter

Table 6: HFMI-treatment: Device setting and parameters of treatment

Parameter	HiFIT	PIT
Frequenz	Ca. 250 Hz	Stufe 2
Vorschubgeschwindigkeit	ca. 5mm/s	ca. 20 cm/min
Versorgungsluftdruck	6,6 - 7,2 bar	6 bar
Intensität	90°, 2,5 Umdrehungen	keine
Bolzendurchmesser oder -radius	3 mm (D)	2 mm (r)
Bolzenform	Kugel	
Länge des Bolzens	53 mm	110 mm

Die HFH-Behandlung der Kleinprüfkörper ist für beide Verfahren in Abbildung 3-12 dargestellt. Seitlich der Nachbehandlungszone wird durch die HFH-Behandlung ein Grat aufgeworfen, siehe Abbildung 3-13. Dieser Grat wird vor Versuchsbeginn am KIT mit einer Schlichtfeile entfernt und anschließend beschliffen.



Abbildung 3-12: Kleinprüfkörper: HiFIT-behandlung (links) und PIT-Behandlung (rechts)

Figure 3-12: Small scale specimens: HiFIT-treatment (left side) and PIT-treatment (right side)

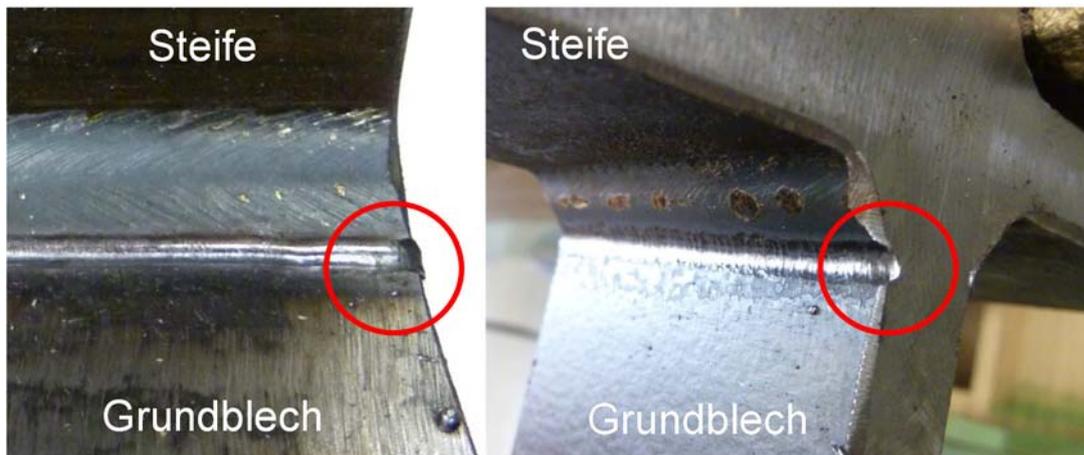


Abbildung 3-13: HFH-behandelte Prüfkörper mit seitlichem Grat: HiFIT (links) und PIT (rechts)

Figure 3-13: HFMI-treated small scale specimens with lateral burr: HiFIT (left side) PIT (right side)

3.4.4.5 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Ermüdungsversuche werden auf einem Hochfrequenzpulsator mit elektromagnetischem Resonanzantrieb, Fabrikat Zwick Röhl, Typ Amsler 400 HFP 5100 am KIT durchgeführt, Abbildung 3-14. Die Proben werden kraftgesteuert unter axialer Beanspruchung bei einem definierten Spannungsschwingbreitenverhältnis R geprüft. Die maximal erreichbare Amplitude der Prüfmaschine beträgt ± 200 kN, die maximale Prüffrequenz bei 300Hz. Die Prüfkraft wird mechanisch über Spannbacken in die Prüfkörper eingetragen. Im Falle der unter Wechsellast bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ zu prüfenden Proben ist im Zuge der Versuchsdurchführung festzustellen, dass die Prüfkapazität des Amsler 400 HFP 5100 bei einem Teil der Prüfkörper nicht ausreicht. Aufgrund dessen werden die Ermüdungsversuche an diesen Prüfkörpern auf einer mechanischen Resonanzprüfmaschine, Fabrikat Schenk (maximale Nennkraft 600 kN) durchgeführt. Die Beanspruchungen sowie die erreichten Lastspielzahlen der einzelnen Ermüdungsversuche können Anhang C entnommen werden. Die Kleinprüfkörper aus den vier Großprüfkörpern werden zu gleichen Teilen auf die einzelnen Versuchsserien

verteilt. Dadurch wird gewährleistet, dass die Ergebnisse der einzelnen Serien im Hinblick auf die gesamte Stichprobe repräsentativ ist.



Abbildung 3-14: Ermüdungsversuch an Quersteife auf Hochfrequenzpulsator am KIT

Figure 3-14: Fatigue test of transverse attachment on high-frequency testing machine at KIT

Die Anrisserkennung wird bei allen Ermüdungsversuchen über zwei Abbruchkriterien gewährleistet: über eine definierte maximale Wegzunahme sowie über eine definierte Frequenzänderung während des Versuchs. Die Ermüdungsversuche werden gestoppt, sobald ein erkennbarer Anriss auftritt. Versagensbilder der Quersteifen bei Versuchsende sind für einen Referenzprüfkörper im Zustand „wie geschweißt“ in Abbildung 3-15 (links) und für eine HFH-behandelte Quersteife, die einen Grundmaterialbruch aufweist in Abbildung 3-15 (rechts) dargestellt. Abbildung 3-16 zeigt typische Versagensbilder von HFH-behandelten Quersteifen, bei denen der Ermüdungsriss am nachbehandelten Schweißnahtübergang auftritt.



Abbildung 3-15: Quersteife mit Ermüdungsrisss am Nahtübergang (Zustand aw, links) und HFH-behandelte Quersteife mit Grundmaterialbruch (rechts)

Figure 3-15: Transverse attachment with fatigue crack at weld toe (as welded, left side) and HFMI-treated transverse attachment with fatigue crack in basic material (right side)



Abbildung 3-16: HiFIT-behandelte Quersteife mit Ermüdungsrisss am Nahtübergang (links) und PIT-behandelte Quersteife mit Ermüdungsrisss am Nahtübergang (rechts)

Figure 3-16: HiFIT-treated transverse attachment with fatigue crack at weld toe (left side) and PIT-treated transverse attachment with fatigue crack at weld toe (right side)

3.4.4.6 Ermüdungsversuche an Kleinprüfkörpern zum Bauteileinfluss (Referenzversuche im Zustand „wie geschweißt“ (aw) und HFH-behandelt)

Die Ermüdungsversuche zum Bauteileinfluss werden unter Zugschwellbeanspruchung bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ durchgeführt. Bei diesen zwei Versuchserien handelt es sich um die „Referenzserien“ zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit der Quersteife in den Zuständen „wie geschweißt“ (aw) und HFH-behandelt (HFH). In 3.4.5.13 werden diese Ergebnisse den Ergebnissen der Trägerversuche gegenübergestellt. Sie dienen der Untersuchung des im Rahmen des Projekts zu untersuchenden Bauteileinflusses. Die Beanspruchungen sowie die erreichten Lastspielzahlen der einzelnen Ermüdungsversuche können Anhang C entnommen werden.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse beider Serien aus Tabelle 4 erfolgt in Form von Nennspannungswöhlerlinien in Abbildung 3-17. Für beide Serien wird der Mittelwert der Ergebnisse als ununterbrochene Linie und der 95 % - Fraktilwert bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von

75 % als strichlierte Linie dargestellt. Die ermittelte Ermüdungsfestigkeit ergibt sich am Einhängewert bei $N_c = 2 \cdot 10^6$ Lastspielen zu $\Delta\sigma_c = 99,6 \text{ N/mm}^2$ für die Quersteifen im Zustand aw (schwarz strichliert dargestellt). Die Wöhlerlinie weist eine Neigung von $m = 3,1$ auf, die mit der Neigung der im EC 3 Teil 1-9 [16] angegebenen Bemessungswöhlerlinie mit einer Neigung von $m = 3$ gut übereinstimmt (rot dargestellt). Die Ermüdungsfestigkeit liegt mit $\Delta\sigma_c = 99,6 \text{ N/mm}^2$ um 24 % höher als der Kerbfall 80, der nach EC 3 für die Bemessung anzusetzen ist.

Die HFH-behandelten Quersteifen erreichen eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 146,0 \text{ N/mm}^2$ (grün strichliert dargestellt). Die Wöhlerlinie verläuft mit einer Neigung von $m = 3,4$ geringfügig flacher als im Zustand aw. Die Ergebnisse der HiFIT- und PIT-behandelten Quersteifen werden gemeinsam ausgewertet. Im HFH-behandelten Zustand ergibt sich eine um 46 % höhere Ermüdungsfestigkeit als im Zustand aw. Verglichen mit dem Bemessungskerbfall des EC 3 wird die Ermüdungsfestigkeit durch die Nachbehandlung um 82 % gesteigert.

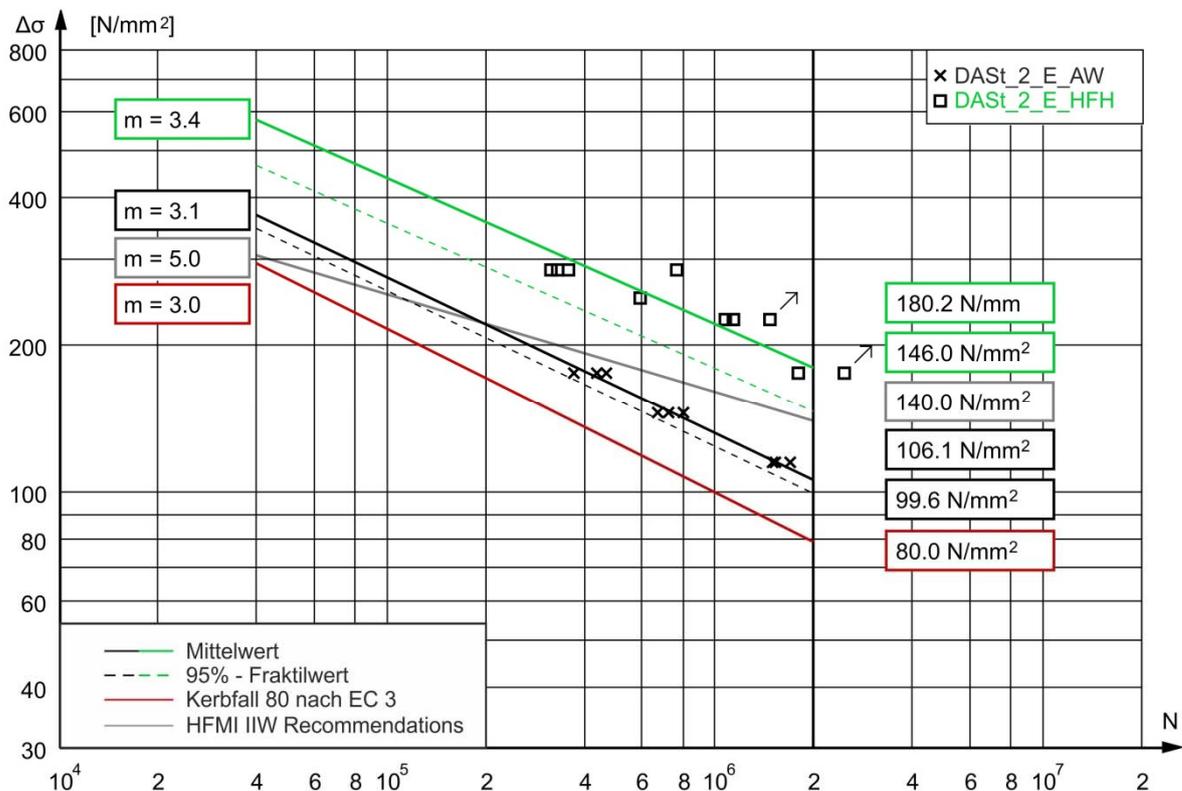


Abbildung 3-17: Nennspannungswöhlerlinien für die Quersteife: Zustand aw (DAST_2_E-AW) und HFH-behandelt (DAST_2_E_HFH), $R = 0,1$

Figure 3-17: S-N curve for nominal stress of transverse attachment: Aw condition (DAST_2_E-AW) and HFMI-treated condition (DAST_2_E_HFH), $R = 0,1$

Zur Einordnung der Ergebnisse und zum Vergleich mit bereits bestehenden Bemessungsempfehlungen, wird zusätzlich die Bemessungswöhlerlinie der IIW Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißnähte [68] (HFMI IIW Recommendations) dargestellt (grau dargestellt). Für Quersteifen aus S355 ist bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ die FAT-Klasse 140 anzusetzen und die Wöhlerlinienneigung wird zu $m = 5$ modifiziert. Es ist festzustellen, dass die Bemessungsempfehlung für die HFH-behandelten Quersteifen des Projekts konservativ ist.

3.4.5 Trägerversuche

3.4.5 Girder tests

3.4.5.1 Überblick

Im Folgenden sind die experimentellen Untersuchungen an Trägerversuchen dargestellt und aufbereitet, eine weiterführende Aufbereitung findet sich in [3].

Ziel der Trägerversuchsserie war die Erfassung und Quantifizierung des **fertigungsmechanischen Einflusses** von HFH-nachbehandelten Schweißnähten am Detail der Quersteife.

Deshalb wurde die Dicke der Bleche nicht verändert, sondern ein Profil HEA 260 gewählt, bei dem die Flanschdicke mit $t_g = 12,5$ mm dem Referenzwert der Grundblechdicke der Prüfkörper entspricht. Somit kann für die Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse für die Trägerversuche der spannungsmechanische und statistische Größeneinfluss ausgeschlossen werden.

Ziel der Trägerversuche war es, den Bauteileffekt zu quantifizieren, sowohl für das Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ als auch für das Spannungsverhältnis $R = -1,0$. Die Träger mit dem Spannungsverhältnis $R = -1,0$ werden der Serie 1 zugeordnet und die Träger mit dem Spannungsverhältnis $R = 0,1$ der Trägerserie 2. Für die Zugschwellbelastung stehen insgesamt 18 Trägerversuche für den Bauteileffekt zur Verfügung. Dabei dienten zwei hieraus als Referenzversuche im unbehandelten Zustand. Das heißt es werden pro Nachbehandlungsverfahren 8 Trägerversuche bei $R = 0,1$ getestet.

3.4.5.2 Materialeigenschaften der Walzträgerserie T2

Um mit den Versuchsergebnissen, die für den Bemessungsentwurf für die Anwendung HFH-Verfahren als Grundlage dienen, auf der sicheren Seite zu liegen, hat man sich darauf geeinigt, die Versuche an Werkstoff S355J2 durchzuführen.

Die Walzträger für die Bauteilversuche stammten von den beiden Profilherstellern *Salzgitter AG* und *Stahlwerk Thüringen*, folglich aus zwei verschiedenen Walzchargen von zwei unterschiedlichen Walzprofilherstellern. Die zugehörigen Werkszeugnisse befinden sich im Anhang B.

Bei den Trägern der Charge 1 handelte es sich um HEA260 Träger aus S355J2+AR. Diese wurden folglich nach dem Walzen nicht normalisiert, so dass es sich hier um Träger mit noch eingepprägten Walzeigenspannungen handelt. Durch den Schweißprozess der Quersteifen in die Träger sind jedoch lokal die Walzeigenspannung durch den Temperatureintrag beim Schweißen aufgehoben, so dass in der näheren Umgebung der Schweißnaht ein Prozess ähnlich dem Normalisieren stattgefunden hat und hierdurch kaum noch Eigenspannungen aus dem Walzvorgang vorlagen. Die primären Eigenspannungen ergaben sich folglich aus dem Schweißprozess beim Einschweißen der Quersteifen.

Die Walzträger wurden derart angefordert, dass Sie den unteren Toleranzen der Werkstofffestigkeiten entsprechen, um Werkstoffeigenschaften auf der sicheren Seite zu erhalten.

Tabelle 7: Materialeigenschaften entsprechend den Abnahmeprüfzeugnis 3.1 in Anhang B

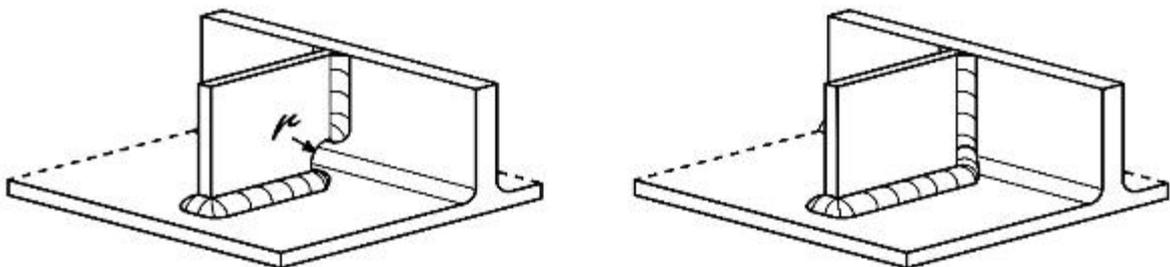
Table 7: Material properties according to inspection certificate 3.1 in attachment B

Chargen -Nr.	Hersteller	Streckgrenze f_y [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_u [N/mm ²]	Bruch- dehnung	R_e/R_m [-]	Kerbschlagarbeit [-20°]
1	<i>Stahlwerk Thüringen</i>	401	521	30	0,77	124,148,154,142
2	<i>Salzgitter AG</i>	Ein Abnahmeprüfzeugnis 3.1 konnte nicht ausgestellt werden				

3.4.5.3 Steifengeometrie

Generell ist es im Brückenbau üblich, die eingeschweißten Quersteifen mit einem runden Freischnitt zu versehen, siehe Abbildung 3-18 a, bzw. [3]. Nachforschungen nach Dürr [30] und Untersuchungen nach Naumann [71] haben allerdings ergeben, dass die eingepasste Quersteife (vgl. Abbildung 3-18 b) eine um 25 % günstigere Ermüdungsfestigkeit aufweist. Dies liegt nach Kerbspannungsbetrachtungen beider Ausführungsvarianten in Dürr [30] weniger an der sich nur geringfügig unterscheidenden Kerbwirkung, sondern hauptsächlich an der Schwierigkeit der Ausführung der Schweißnaht, so dass eine Umschweißung der einzelnen umlaufenden Kehlnähte im Bereich des runden Freischnitts schwer herzustellen ist und sich hierdurch eher Schweißnahtfehler in den schlecht zugänglichen Freischnittbereichen ergeben.

Das gleiche gilt für die Nachbehandlung der Schweißnahtübergänge in diesem Bereich, wie auch beim Schweißen ist es hier aufgrund der behinderten Zugänglichkeit nicht möglich, den Pin des Handgeräts sauber an die Stirnnaht der Quersteife zwischen Steifenradius und Steg zu führen, siehe [3]. Der Praxistest hat gezeigt, dass eine kontrollierte und zweckmäßige Nachbehandlung des Schweißnahtübergangs mit den derzeit zur Verfügung stehenden Pin-Geometrien nicht möglich ist. Abbildung 3-19 zeigt den Praxistest, der im Vorfeld an einem aus einem anderen Forschungsprojekt vorliegenden Versuchsträger mit Quersteifen und Freischnittausbildung mit einem Radius von $r = 30$ mm durchgeführt wurde, siehe [3]. Aus diesen beiden Gründen hat man sich projektintern auf die Ausführungsvariante mit eingepassten Steifen geeinigt.



a) Ausführung mit Freischnitt

b) Ausführung ohne Freischnitt

Abbildung 3-18: Detailausbildung bei eingeschweißten Quersteifen in Trägerquerschnitte [3]

Figure 3-18: Detailing of welded transverse attachments in girder sections [3]

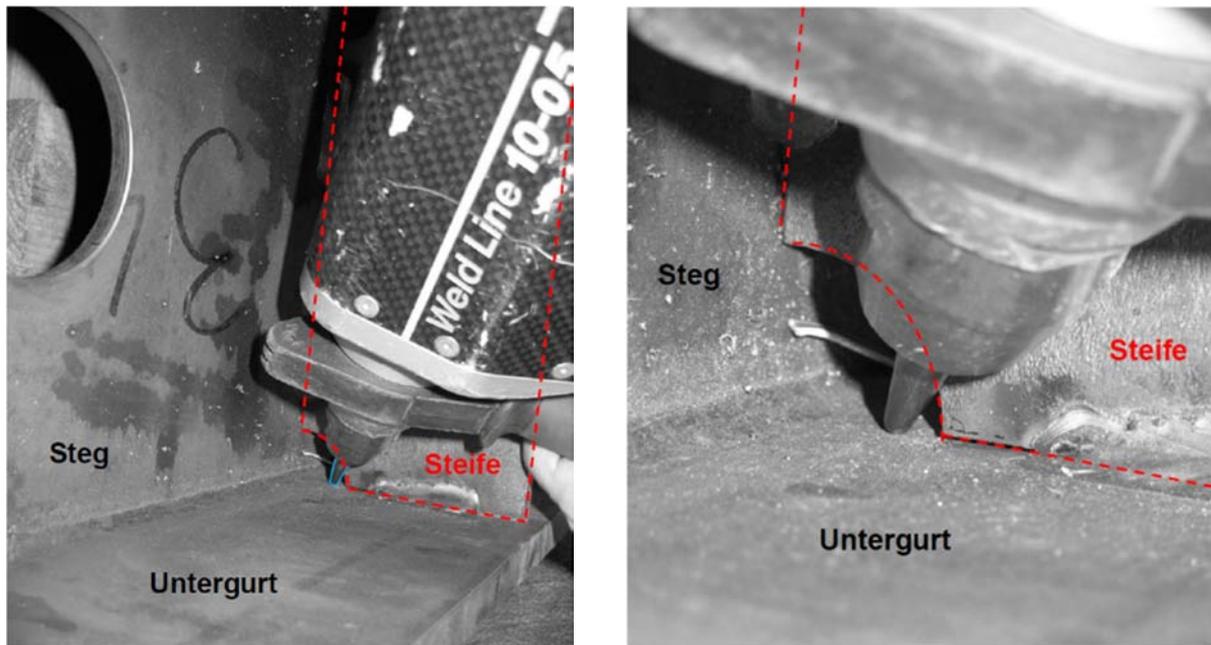


Abbildung 3-19: Praxistest mit PIT-Gerät an geschweißtem Träger mit Quersteife und kreisförmigen Freischnitt $r = 30 \text{ mm}$ [3]

Figure 3-19: Practical test with PIT-device at welded girder with transverse attachment and circular cutting $r = 30 \text{ mm}$ [3]

3.4.5.4 Versuchskörperfertigung der Trägerversuchsreihe T2 ($R = 0,1$)

Alle Trägerversuche sowie Kleinprüfkörper wurden bei der Firma *Eiffel Deutschland Stahltechnologie* (heute *SEH Engineering GmbH*) in Hannover gefertigt. Sowohl die Auflagersteifen, als die zu prüfenden Quersteifen wurden jeweils in Wannenlage mittels MAG 135 Schweißen an den Träger geschweißt. Die Schweißparameter sowie die Schweißfolge können Anhang B entnommen werden. Abbildung 3-20 zeigt das manuelle Einschweißen der Quersteifen in den Walzträger in Wannenlage.



Abbildung 3-20: Anheften und Einschweißen der Quersteifen in Wannenlage [3]

Figure 3-20: Tack welding and welding of transverse stiffener in flat position [3]

3.4.5.5 Nachbehandlung der Trägerversuchsreihe T2 ($R = 0,1$)

Die Nachbehandlung der Versuchskörper wurde jeweils von den Geräteherstellern von geschultem Fachpersonal durchgeführt. Die Nachbehandlungsparameter und -einstellungen der

jeweiligen Verfahren können Anhang B entnommen werden und entsprechen damit den in Kapitel 2.3 vorgestellten üblichen Nachbehandlungsparametern der beiden Verfahren.

Bei der Nachbehandlung mittels PIT-Verfahren wurde für die Nachbehandlung der Nahtübergänge der äußeren Steifenkante eine modifizierte konkave Pinform gewählt.



Abbildung 3-21: Nachbehandlung mit HiFIT durch die Firma *DYNATEC GmbH* [3]



Abbildung 3-22: Nachbehandlung mit PIT durch die Firma *Pitec GmbH* [3]

Figure 3-21: Post-weld treatment with HiFIT realized by *DYNATEC GmbH* [3]

Figure 3-22: Post-weld treatment with PIT realized by *Pitec GmbH* [3]

3.4.5.6 Abmessungen der Trägerversuchsreihe T2 ($R = 0,1$)

Im Vorfeld der Versuchsdurchführung wurden die Ist-Abmessungen der Versuchsträger vermessen, siehe [3]. Tabelle 8 fasst die Ist-Abmessungen der untersuchten Versuchsträger vor der Versuchsdurchführung zusammen. Beide Trägerchargen wiesen tendenziell Minustoleranzen auf, so dass insgesamt geringere Widerstandsmomente für die Abtragung zur Verfügung standen als gemäß Soll-Abmessungen. Beide Trägerchargen wiesen Walztoleranzen auf, so dass das tatsächliche Widerstandsmoment $W_{y,ist}$ kleiner als das nominelle Trägerwiderstandsmoment ($W_{y,soll} = 836,4 \text{ cm}^3$) ist. Durch die insgesamt geringeren Querschnittswerte ergaben sich für die Auswertung abweichende Nennspannungsschwingbreiten als geplant.

Tabelle 8: Abmessungen der Trägerversuche T1 (R = 0,1) [3]

Table 8: Dimensions of girder test series T1 (R = 0.1) [3]

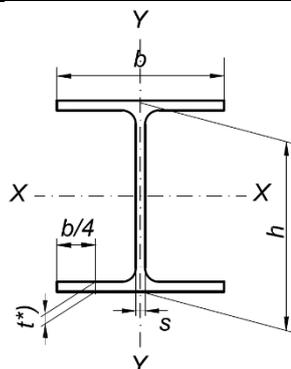
Bezeichnung	Zustand	Charge	t_w [mm]	t_g [mm]	h_{ges} [mm]	$W_{y,ist}$ [cm ³]
Soll			7,5	12,5	250	836,4
T2.1	aw	2	8,0	11,7	253	772
T2.2	PIT	1	7,4	12,6	253	798
T2.3	PIT	2	8,1	12,5	253	798
T2.4	aw	1	7,4	11,8	253	772
T2.5	PIT	1	7,4	12,6	252	779
T2.6	PIT	1	7,4	12,5	252	798
T2.7	PIT	2	8,2	11,7	253	763
T2.8	PIT	1	7,5	12,5	251	798
T2.9	PIT	2	8,3	11,7	253	761
T2.10	PIT	1	7,5	12,7	252	795
T2.11	HiFIT	1	7,4	12,6	254	795
T2.12	HiFIT	2	8,1	11,8	253	767
T2.13	HiFIT	2	8,2	11,7	255	767
T2.14	HiFIT	2	8,1	11,8	254	767
T2.15	HiFIT	2	8,1	11,8	253	767
T2.16	HiFIT	1	7,6	12,8	253	802
T2.17	HiFIT	1	7,5	12,6	252	807
T2.18	HiFIT	1	7,4	12,5	251	801

Es wurden für die weitere Auswertung in Tabelle 10 die Werte der Tabelle 8 benutzt. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die zulässigen Walztoleranzen von Breitflanschträgern nach DIN EN 10034 [23]. Gemäß den Bestimmungen in DIN EN 10034 [23] konnten für die gelieferten HEA 260-Profile die zulässigen Toleranzen eingehalten werden, die Abmessungen sowie die Toleranzen für das HEA260 Profil sind hellgrau hinterlegt.

Tabelle 9: Grenzabmaße des Querschnitts für Breitflanschträger nach DIN EN 10034 [23]

Table 9: Tolerances of the transverse section for wide-flanged beams according to DIN EN 10034 [23]

Profilhöhe h		Flanschbreite b		Stegdicke s		Flanschdicke t	
Nennmaß mm	Grenz- abmaß	Nennmaß	Grenz- abmaß	Nennmaß	Grenz- abmaß	Nennmaß	Grenz- abmaß
$h \leq 180$	+3,0 -2,0	$b \leq 110$	+4,0 -1,0	$S < 7$	+0,7 -0,7	$t < 6,5$	+1,5 -0,5
$180 < h \leq 400$	+4,0 -2,0	$110 < b \leq 210$	+4,0 -2,0	$7 \leq s < 10$	+1,0 -1,0	$6,5 \leq t < 10$	+2,0 -1,0
$400 < h \leq 700$	+5,0 -3,0	$210 < b \leq 325$	+4,0 -4,0	$10 \leq s < 20$	+1,5 -1,5	$10 \leq t < 20$	+2,5 -1,5
$h > 700$	+5,0 -5,0	$b > 325$	+6,0 -5,0	$20 \leq s < 40$	+2,0 -2,0	$20 \leq t < 30$	+2,5 -2,0
				$40 \leq s < 60$	+2,5 -2,5	$30 \leq s < 40$	+2,5 -2,5
				$S \geq 60$	+3,0 -3,0	$40 \leq s < 60$	+3,0 -3,0
						$t \geq 60$	+4,0 -4,0



*) t ist bei b/4 zu messen
(siehe Abschnitt 4.4)

3.4.5.7 Messtechnik

Zur Überwachung der Rissinitiierung und Dokumentation der tatsächlich aufgetragenen Dehnungen wurden je Quersteife auf der Oberseite des Zuggurts vier lineare Dehnmessstreifen (DMS) aufgeklebt. So konnten Längsdehnungen des Untergurts an den entsprechenden Stellen beobachtet und Abweichungen ab dem Zeitpunkt eines Dehnungsabfalls mitverfolgt werden. Um die Erfassung lokal erhöhter Dehnungen zu vermeiden, wurde ein Abstand von 25 mm von Quersteifenaußenkante zum Mittelpunkt des DMS gewählt.

In Summe wurden bei den ersten Trägerversuchen mindestens 24 DMS appliziert. Als sich im Verlauf der Versuchsdurchführung herausstellte, dass die Anrissstelle potentiell nahe des Stegs entsteht, wurde auf die DMS an der Gurtaußenkante verzichtet. Teilweise wurden die

freien Messkanäle genutzt, um im Druckbereich Dehnungen aufzuzeichnen, siehe weiterführende Untersuchungen hierzu in [3]. Zusätzlich wurden Strukturdehnungen an ausgewählten Trägerversuchen aufgenommen, siehe weiterführende Betrachtungen in [3].

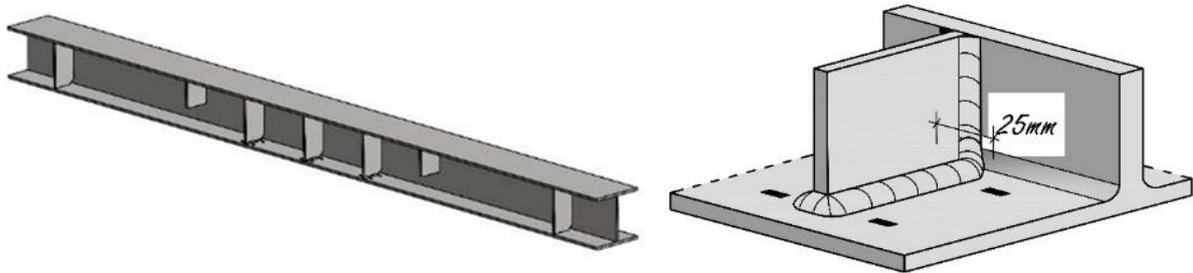


Abbildung 3-23: Anordnung der Dehnmessstreifen am Zuggurt nahe der Quersteife [3]

Figure 3-23: Arrangement of strain gauges on tensioned flange close to transverse stiffener [3]

3.4.5.8 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung der Trägerversuchsreihe T2 ($R = 0,1$)

Zur Versuchsdurchführung stand an der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart das Spannfeld mit einem Portal und zwei Hydraulikzylindern mit jeweils einer maximalen statischen Druckkraft von 600 kN zur Verfügung. Mithilfe dieser zwei Zylinder konnte ein Vier-Punktbiegeversuchsaufbau realisiert werden, der es ermöglichte im Bereich zwischen den Lasteinleitungspunkten einen konstanten Momentenverlauf zu erzeugen, siehe Abbildung 3-24. So konnten mit nur einem Trägerversuch drei bzw. sechs Querstreifen parallel unter gleicher nomineller Spannungsschwingbreite getestet werden.

An den Auflagerpunkten wurde der Träger in Trägerlängsrichtung gelenkig aufgelagert. Mit Teflonscheiben unter den Auflagern wurde erreicht, dass Verschiebungen in beide Längsrichtungen ermöglicht wurden. Abbildung 3-25 links zeigt die Ausführung des Lagerpunkts. Die Gelenkwelle wurde ebenfalls auf PTFE-Scheiben gelagert. Hierfür wurde auf ein besonders leistungsfähiges PTFE-Material mit Bronze-Glimmer zurückgegriffen, das in die Taschen des Auflagerprismas eingelegt wurde, um die Lagerkonstruktion für lange Laufzeiten auszulegen und die zwangsfreie Verformung dauerhaft zu gewährleisten. Ebenso wurden beide Lasteinleitungspunkte mit Kalottenlager und PTFE versehen, um Zwangsbeanspruchungen zu vermeiden. Die Prüfgeschwindigkeit war mit Frequenzen zwischen 1,5 und 3,0 Hz verhältnismäßig gering.

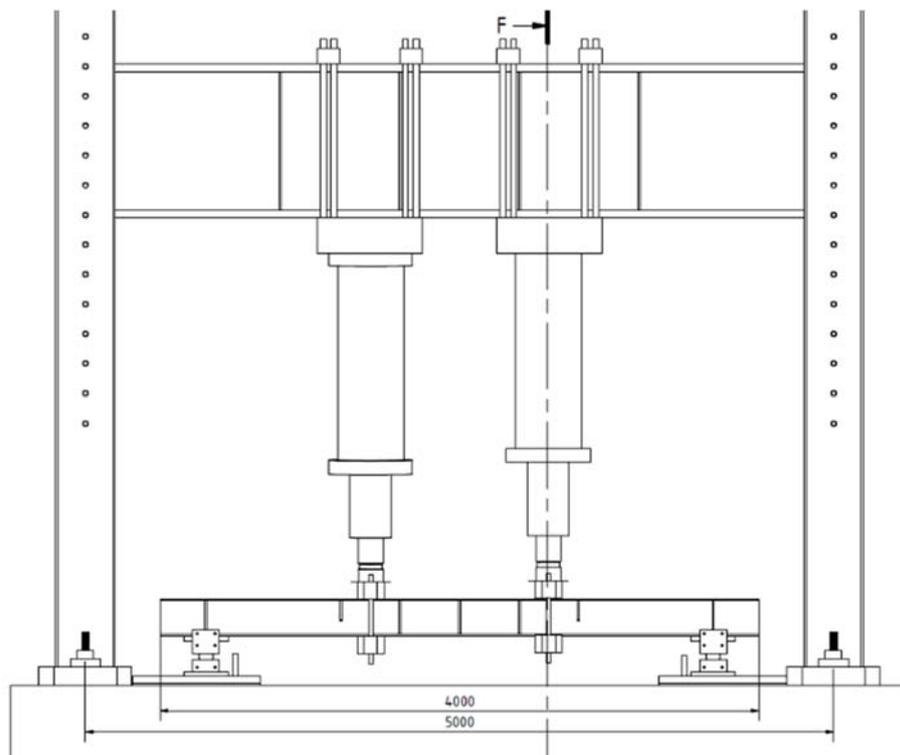


Abbildung 3-24: Versuchsaufbau der Trägerserie T2 [3]

Figure 3-24: Test setup of beam test series T2 [3]

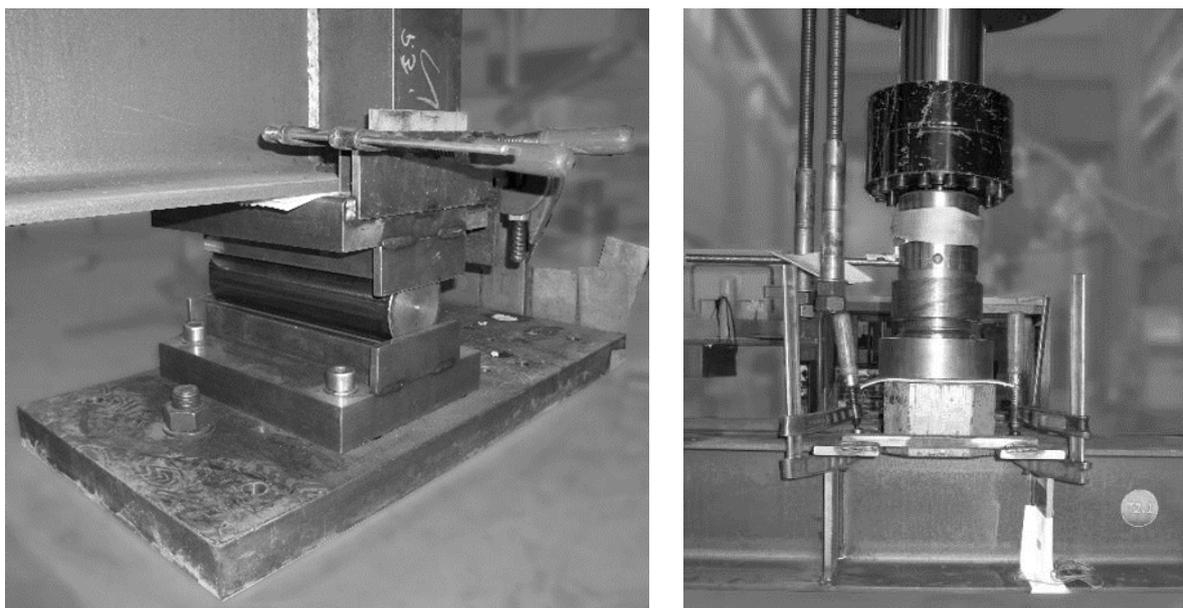


Abbildung 3-25: Gelenkiger Lagerpunkt und Lasteinleitungspunkt der Trägerserie T2 [3]

Figure 3-25: Pinned supporting point and load introduction of beam test series T2 [3]

3.4.5.9 Nennspannungen der Trägerversuchsreihe T2 ($R = 0,1$)

Für die Ergebnisdarstellung der Trägerversuche und für die Vergleichbarkeit der Kleinversuchsergebnisse mit den Trägerversuchsergebnissen ist es wichtig, die korrekte Nennspannung bezogen auf die Spannungsgradienten am Trägerquerschnitt zu erfassen. Hierzu wurde für den Fall „geschweißter Träger“ in [49] die Nennspannung für Gurtstöße und Halsnähte sowie Stegstöße definiert. Für die eingeschweißte unbelastete Quersteife in ein gewalztes Profil HEA260 lässt sich der Fall übertragen, so dass die Nennspannung auf der Unterseite des unter Biegezugspannung stehenden Obergurts die Stelle der relevanten Nennspannung ist. Für die Soll-Abmessungen eines HEA260-Profiles ergibt sich aus dem Verhältnis von Gurtstärke zu halber Trägerhöhe ein Faktor von 0,9 bezogen auf die Biegegrandspannung σ_{aR} , siehe Abbildung 3-26.

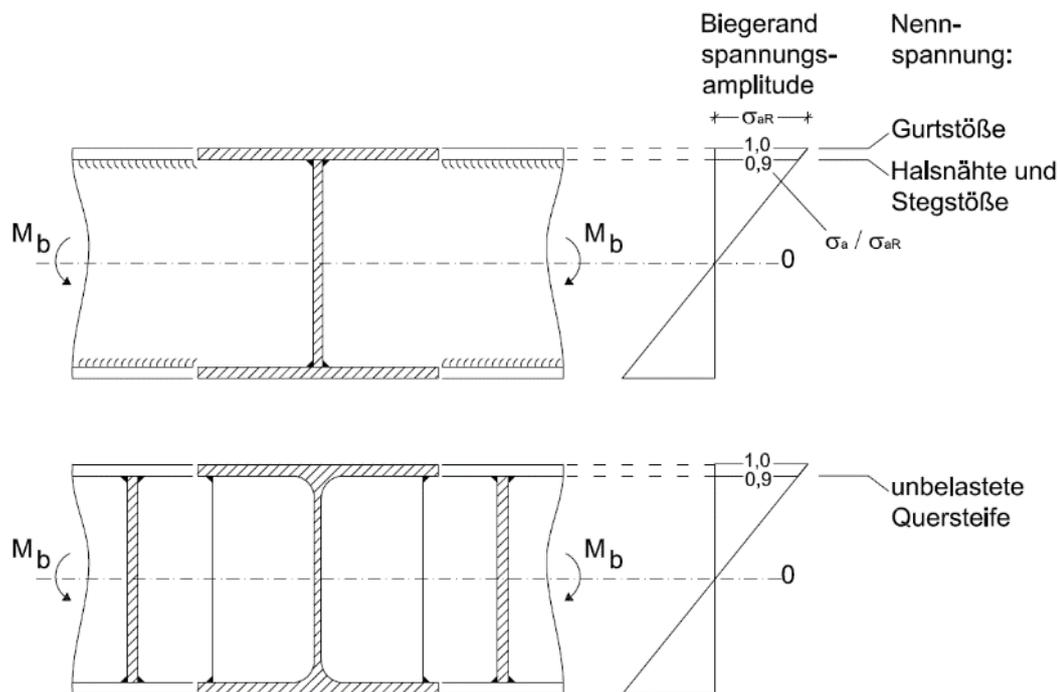


Abbildung 3-26: Anpassung der Nennspannungsdefinition am Trägerquerschnitt nach Helms [48] auf gewaltes HEA260 Profil mit eingeschweißter Quersteife [3]

Figure 3-26: Adaption on nominal stress definition for girder section by Helms [48] to rolled HEA260 profile with welded transverse attachment [3]

Im Rahmen von [3] wurden unterschiedliche Möglichkeiten der Nennspannungsermittlung gegenübergestellt. Tabelle 10 fasst die unterschiedlich ermittelten Nennspannungen der Trägerversuche T2 zusammen. Es fällt auf, dass die Messungen aus der globalen Dehnung in Feldmitte (DMS-Bezeichnung: M4) unter Berücksichtigung der Rückrechnung der Spannung auf Höhe der Obergurtoberseite eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten aus den Ist-Trägerabmessungen zeigte. Dies alles wurde ermittelt mit der Annahme eines Elastizitätsmoduls von 210.000 N/mm².

Die Abweichungen lagen in einem Fall maximal bei 5%. In 94 % der 18 Träger ist die berechnete Nennspannungsschwingbreite geringer als die aus der Dehnungsmessung berechnete Spannung und somit für die Auswertung auf der sicheren Seite.

Abbildung 3-34 zeigt die Versuchsergebnisse der Träger-Zugschwellversuche unter Berücksichtigung der Nennspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{nom, rechnerisch}}$ im doppelt logarithmischen S-N-Diagramm.

Tabelle 10: Vergleich der Nennspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{nom}$ der Trägerversuche T2 (R = 0,1) [3]

Table 10: Comparison of nominal stress range $\Delta\sigma_{nom}$ of girder test series T2 (R = 0.1) [3]

Bezeichnung	Zustand	$W_{y,ist}$ [cm ³]	$\Delta\sigma_{Nom,rechn-}$ r risch [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{Nom,DMS M4,}$ dyn [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{Nom,DMS lo-}$ kal [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{Nom,DMS}$ M4,vor [N/mm ²]
T2.1	aw	772	191,4	180,1	185,2	199,3
T2.2	PIT	798	235,8	200,8		245,5
T2.3	PIT	798	218,0	229,9	219,2	
T2.4	aw	772	191,3	191,9	179,6	193,4
T2.5	PIT	779	204,2	200,7	187,1	230,1
T2.6	PIT	798	183,8	183,0		185,1
T2.7	PIT	763	193,6	195,5	181,4	196,7
T2.8	PIT	798	235,8	236,5	226,8	237,4
T2.9	PIT	761	211,5	216,1	200,3	216,6
T2.10	PIT	795	200,6	198,8	187,1	197,3
T2.11	HiFIT	795	236,8	238,3	226,8	244,2
T2.12	HiFIT	767	247,0	245,1	234,4	247,1
T2.13	HiFIT	767	210,1	219,7	200,3	212,4
T2.14	HiFIT	767	192,5	198,9	181,4	197,2
T2.15	HiFIT	767	192,5	195,4	179,6	192,8
T2.16	HiFIT	802	198,8	202,2	185,2	203,5
T2.17	HiFIT	807	181,6	187,1	173,9	190,1
T2.18	HiFIT	801	199,4	204,2	194,7	

3.4.5.10 Versagen der Trägerversuchsreihe T2 (R = 0,1)

Abbildung 3-27 zeigt am Beispiel von T2.8 die globale Versagensstelle stellvertretend für die weiteren Versuchsträger. Die drei getesteten eingeschweißten Quersteifen je Trägerseite lassen sich anhand der aufgetragenen weißen Markierungsfarbe erkennen. In 23 von 24 Fällen wurde der Riss an einer der sechs umlaufenden Quersteifennähte initiiert. Lediglich in einem Fall wurde ein Grundmaterialversagen durch Reibung zwischen Untergurt und Längsfixierung erzeugt.

In Abbildung 3-28 ist das Risswachstum eines Quersteifen-Nahtübergangs dargestellt. Die Rissentstehung des Trägers T2-17 in Bezug auf die Steifenbreite b ist relativ mittig. Ab der Rissinitiierung (ca. A - A) wächst der Riss gleichmäßig im Untergurt Richtung Untergurtkante und Steg.



Abbildung 3-27: Versagen der Trägerserie T2 am Nahtübergang der Quersteife [3]

Figure 3-27: Failure of girder series T2 at weld toe of the transverse stiffener [3]

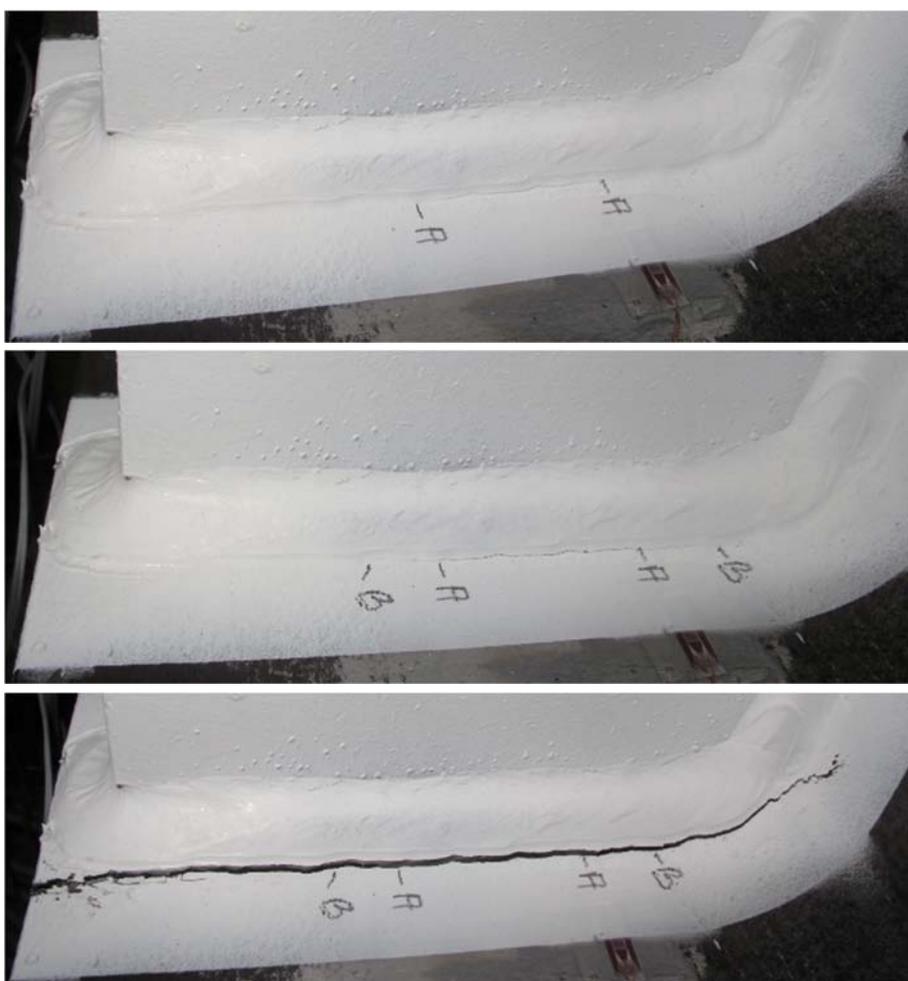


Abbildung 3-28: Draufsicht auf Risswachstum am Schweißnahtübergang der Quersteife (T2.17-S3R+) [3]

Figure 3-28: Top view on crack growth at weld toe of transverse stiffener (T2.17-S3R+) [3]

Um den Versagensmodus und die Bruchfläche näher zu interpretieren, wurden sechs aus achtzehn geprüften Trägern ausgewählt und an den Rissen aufgetrennt, so dass man nach dem Öffnen die Bruchfläche betrachten konnte, siehe [3]. Bei der Versuchsdurchführung hat sich gezeigt, dass die Risse immer am Nahtübergang von Quersteife zu Unterflansch entstanden sind. Bezogen auf den Trägerquerschnitt war der Ort der Rissinitiation häufig nahe dem Ausrundungsradius zu identifizieren. Im Folgenden sind in Abbildung 3-29 bis Abbildung 3-32 Fotos der Bruchflächen mit Markierungen an den markanten Rissinitiationsstellen gegeben. In den abgebildeten Fällen lässt sich deutlich eine Ellipse für den Ermüdungsrisswachstum erkennen. Außerdem kann man Stufen erkennen, diese entstehen durch Rissinitiation an verschiedenen Stellen. Bei Überlagerung der einzelnen Ermüdungsellipsen, entstehen diese Stufen. Detaillierte Betrachtungen der Bruchflächen können [3] entnommen werden.



Abbildung 3-29: Bruchbild Versuchsträger T1 AW [3]

Figure 3-29: Fracture pattern test girder T1 AW [3]



Abbildung 3-30: Bruchbild Versuchsträger T1 AW – Detailansicht [3]

Figure 3-30: Fracture pattern test girder T1 AW - detail [3]



Abbildung 3-31: : Bruchbild Versuchsträger 2.18 – Steife Nr. 5 [3]

Figure 3-31: Fracture pattern test girder 2.18 - stiffener no. 5 [3]



Abbildung 3-32: : Bruchbild Versuchsträger 2.18 – Steife Nr. 5 – Detailansicht [3]

Figure 3-32: Fracture pattern test girder 2.18 - stiffener no. 5 - detail [3]

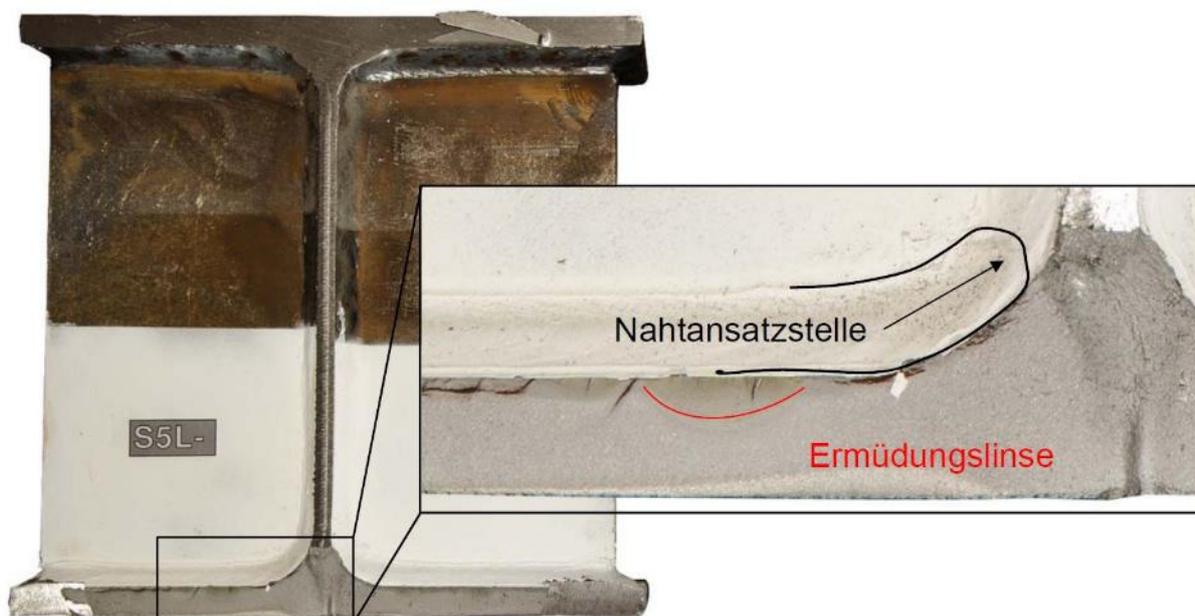


Abbildung 3-33: Bruchfläche mit Ermüdungsanriss und Nahtansatzstelle [3]

Figure 3-33: Fracture pattern with fatigue crack and weld start position [3]

3.4.5.11 Versuchsergebnisse der Versuchsergebnisse der Trägerversuchsreihe T2 (R = 0,1)

Die einzelnen Datenpunkte aus der Trägerversuchsserie T2 sind in Abbildung 3-34 getrennt nach Nachbehandlungszustand (HFH und AW) dargestellt. Um einen Vergleich zum HFH-behandelten Zustand zuzulassen, sind die Kerbfallklassen 80 und 160 nach EN 1993-1-9 [16] im Diagramm gekennzeichnet.

Die im unbehandelten Zustand belassenen Träger zeigen zwar verhältnismäßig hohe Lastwechselzahlen N , die deutlich über dem Kerbfall 80 für das unbehandelte Quersteifendetail liegen, jedoch erreichen die Träger mit nachbehandelten Quersteifennähte noch deutlich höhere Werte. Gegenüber den Wöhlerlinien der unbehandelten Kerbfallklassen aus EN 1993-1-9 erkennt man die flachere Neigung der HFH-nachbehandelten Versuchsergebnisse.

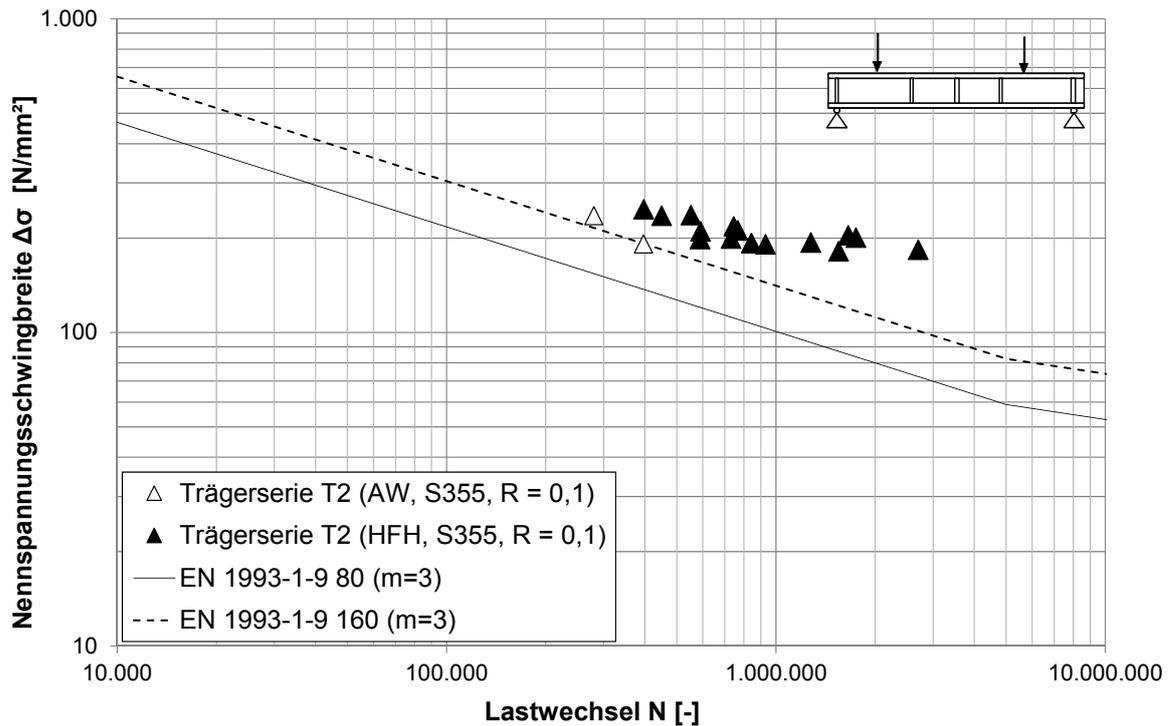


Abbildung 3-34: Versuchsergebnisse der Träger-Zugschwellversuche $R = 0,1$ [3]

Figure 3-34: Test results of girder tests with tension-tension-stresses $R = 0.1$ [3]

3.4.5.12 Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse der Trägerversuchsreihe T2 ($R = 0,1$)

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung dieser Versuchsreihe dargestellt. Die Vorgehensweise der statistischen Auswertung ist in Anhang A beschrieben. Die Basis dieses Auswerteverfahrens bietet das Hintergrunddokument [84].

In vorangehenden Forschungsprojekten, beispielsweise in [61] konnten keine systematischen Abweichungen der erreichten Lastwechselzahlen der unterschiedlichen Höherfrequenten Hämmer Verfahren (HiFIT und PIT) erkannt werden, siehe auch Kapitel 2. Deshalb wurden im Rahmen dieses Projekts die beiden Verfahren gemeinsam ausgewertet.

Die Auswertung kann hierbei mit einer fest vorgegebenen oder einer freien, aus der vorliegenden Stichprobe ermittelten Wöhlerlinien-Neigung durchgeführt werden. Abbildung 3-35 zeigt die Ermüdungsfestigkeitskurve für die Auswertung der HFH-nachbehandelten Serie mit fest vorgegebener Neigung $m = 5$. Hierfür wurde für den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit bei 2 Mio. Lastwechsel eine Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 151$ N/mm² (schwarzer Stern) erreicht.

Zusätzlich ist in Abbildung 3-35 die empfohlene Wöhlerlinie nach IIW-Richtlinie [68], mit einem Bezugswert von 140 N/mm² (grauer Stern) angedeutet. Durch die Angabe der Wöhlerlinie wird deutlich, dass alle HFH-behandelten Trägerversuche der Serie T2, deren Eigenspannungszustand im Wesentlichen dem realer Bauwerke entspricht, Ergebnisse liefern, die über der vom IIW-vorgeschlagenen Festigkeit liegen.

Die Ermüdungsfestigkeitskennlinie unter Berücksichtigung einer freien Neigung dieser Stichprobe ist in Abbildung 3-36 dargestellt. Die tatsächliche Neigung dieser Versuchsserie liegt mit $m = 4,4$ etwas unterhalb der für HFH-nachbehandelte Schweißdetails. Der Unterschied der

Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit durch die unterschiedliche Wöhlerlinienneigung liegt lediglich bei 6 %. Auch hier ist der IIW-Richtlinien-Vorschlag [68] gegeben.

In Hinblick auf die Ermittlung eines Verbesserungsfaktors gegenüber dem ursprünglichen Kerbfall 80 N/mm² nach Eurocode 1993-1-9 [16], kann für die nachbehandelten Trägerversuche je nach Neigung ein Verbesserungsfaktor k_{imp} von 1,89 ($m = 5$) bzw. 1,79 ($m = 4,4$) erreicht werden.

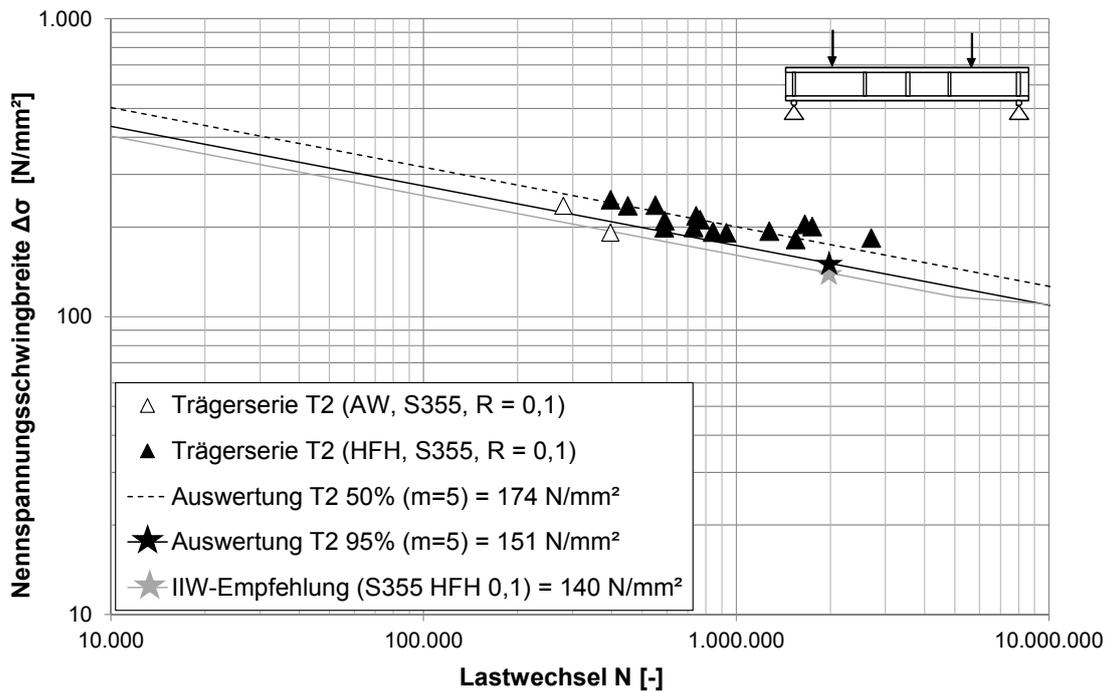


Abbildung 3-35: Auswertung der Ergebnisse der Träger-Zugschwellversuche R = 0,1 unter fixer Neigung (m = 5) [3]

Figure 3-35: Evaluation of results from girder-tests with tension-tension stresses R = 0.1 with fixed slope (m = 5) [3]

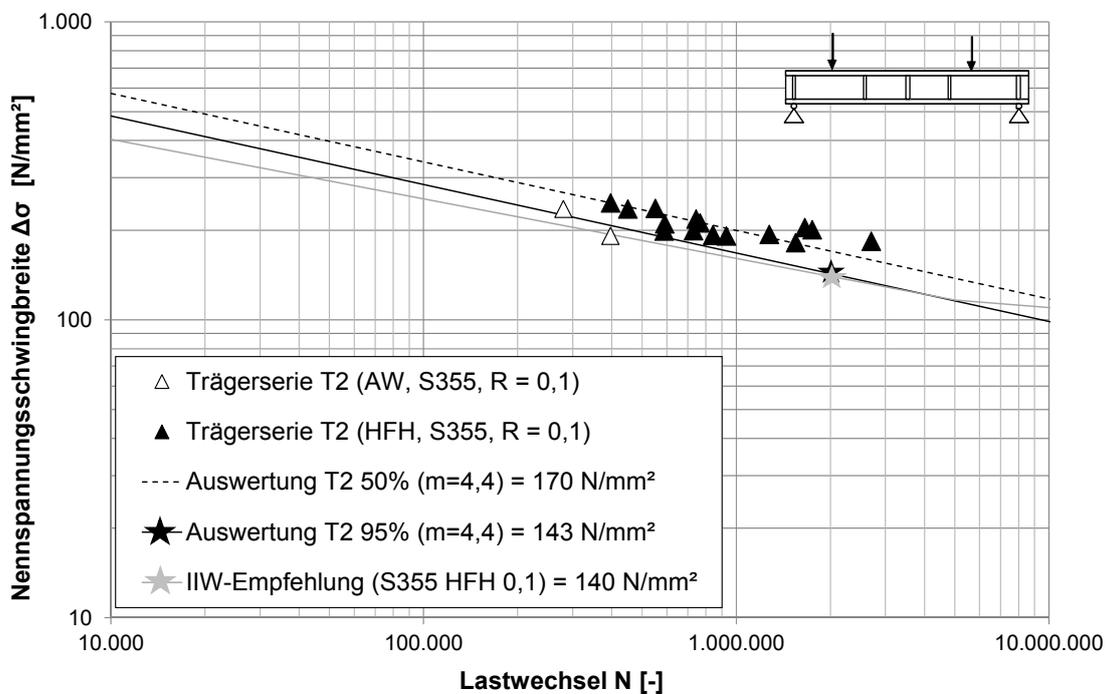


Abbildung 3-36: Auswertung der Ergebnisse der Träger-Zugschwellversuche R = 0,1 unter freier Neigung (m = 4,4) [3]

Figure 3-36: Evaluation of results from girder-tests with tension-tension stresses R = 0.1 with variable slope (m = 4.4) [3]

3.4.5.13 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Klein- und Trägerversuchen

Einen Vergleich der Ergebnisse der Trägerversuchsserie T2 zur Kleinversuchsserie E2 zeigt Abbildung 3-37. Es wird deutlich, dass ein Bauteileffekt für die HFH-nachbehandelten Serien unter Zugschwellbeanspruchung $R = 0,1$ kaum vorhanden ist. So ergibt sich die Ermüdungsfestigkeit der Trägerserie T2 zu $\Delta\sigma_c = 143 \text{ N/mm}^2$ und die der Kleinserie zu $\Delta\sigma_c = 146 \text{ N/mm}^2$. Der Bauteileffekt liegt demnach bei den vorliegenden Serien bei knapp 2 %. Zwar ist eine Auswertung der im Schweißzustand belassenen Versuchsträger aufgrund der geringen Anzahl nicht sinnvoll, jedoch erschließt sich im Vergleich zu den unbehandelten Kleinversuchskörpern eine relativ hohe Ermüdungsfestigkeit für die zwei getesteten Versuchsträger: Eine detailliertere Darstellung und mögliche Ursachen für die verhältnismäßig hohe Ermüdungsfestigkeit können [3] entnommen werden.

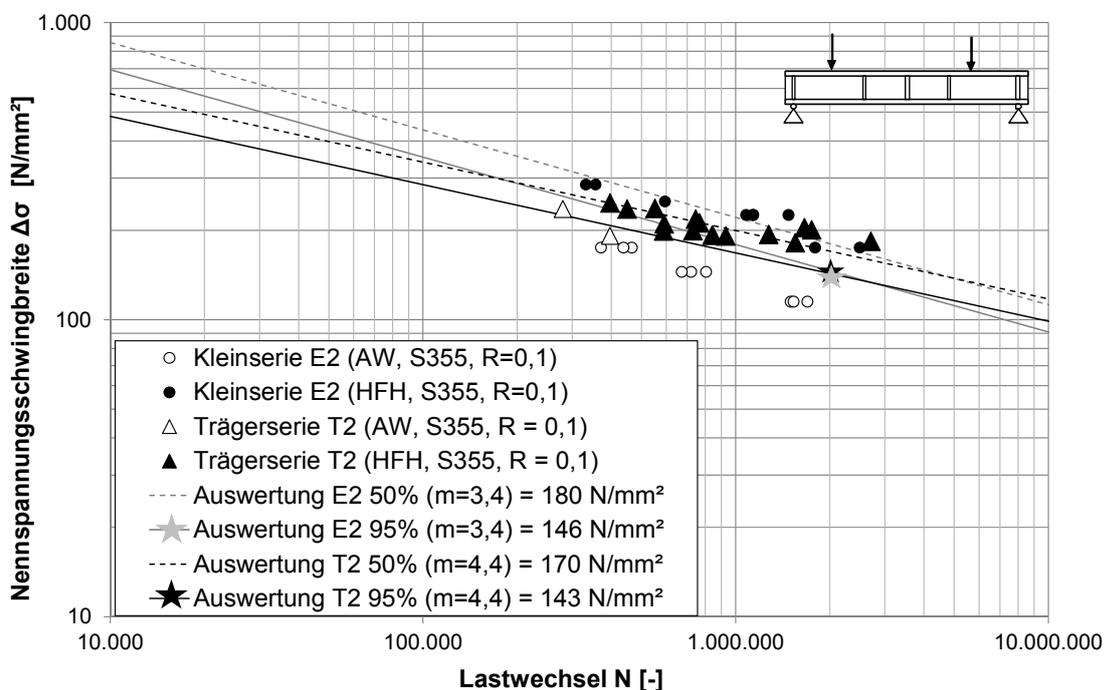


Abbildung 3-37: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Trägerversuchsserie T2 und Kleinversuchsserie E2 [3]

Figure 3-37: Comparison of test results from girder test series T2 and small scale series E2 [3]

3.5 Einfluss der Mittelspannung

3.5 Influence of mean stress

3.5.1 Allgemeines

3.5.1 General

Die Mittelspannung σ_m beschreibt den Mittelwert der Ober- σ_o und Unterspannung σ_u in einer Probe, siehe Gleichung (3.5), das Spannungsverhältnis R die Beziehung von Unterspannung σ_u zu Oberspannung σ_o , siehe Gleichung (3.6). In Abhängigkeit dieses Spannungsverhältnisses

R lässt sich die Art der Belastung einteilen in den Druckschwell-, Zugschwell- oder Wechsel- lastbereich, siehe Abbildung 3-38.

$$\sigma_m = (\sigma_o / \sigma_u) / 2 \quad (3.5)$$

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (3.6)$$

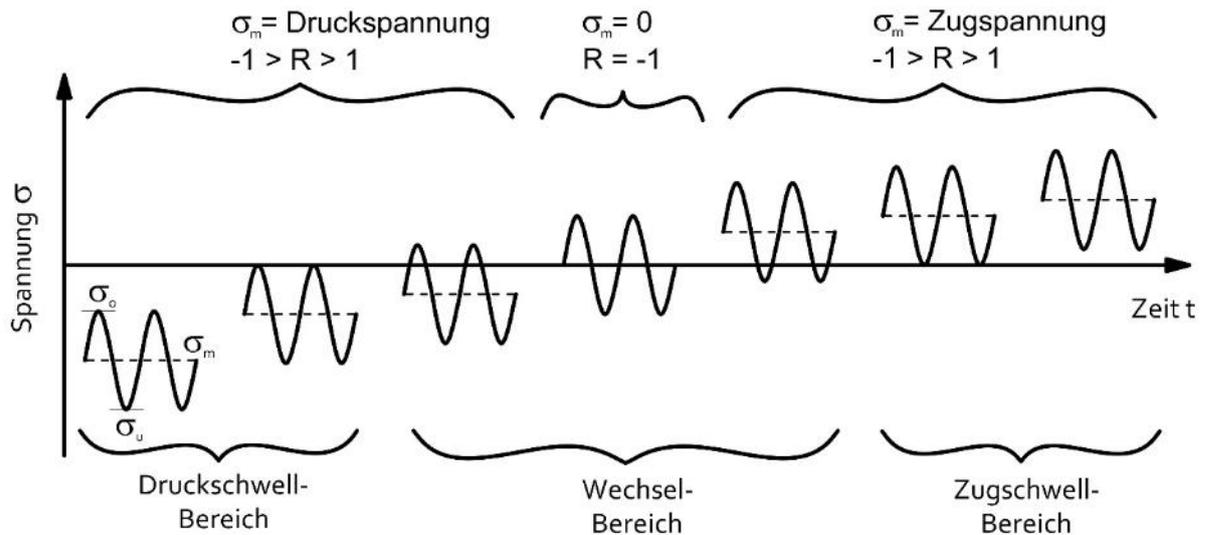


Abbildung 3-38: Mittelspannungen im Überblick

Figure 3-38: Overview of mean stresses

Bei Proben, die idealer Weise **keine Eigenspannungen** aufweisen, ergeben sich die Bauteilspannungen und somit die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ alleine aus der äußeren Beanspruchung, siehe Abbildung 3-39. Durch eine Wechselbeanspruchung ($R = -1,0$), mit sich abwechselnden Druck- und Zugspannungen, erreicht man durch die positiv wirkenden, riss-schließenden Effekte einer Druckbeanspruchung eine geringere Schädigung als beispielsweise durch eine reine Zugschwellbelastung. Folglich beeinflusst im Fall von Bauteilen ohne Eigenspannungen die Höhe der Mittelspannung die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils.

Dieser Effekt der Mittelspannungsabhängigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit lässt sich auf geschweißte und somit **eigenspannungsbehaftete** Bauteile nicht übertragen. In diesem Fall setzt sich die Gesamtbeanspruchung des Bauteils aus den im Bauteil vorliegenden Eigenspannungen und der äußeren Beanspruchung zusammen, siehe Abbildung 3-40. Die Höhe der Eigenspannungen an der Stelle der geometrischen Kerbe durch den Schweißprozess entspricht dabei meist der Höhe der Streckgrenze. Durch die äußere Beanspruchung kommt es zur Überlagerung der Spannungen und die Streckgrenze ist im Falle äußeren Zugspannungen mit Beginn des ersten Lastzyklus erreicht. Infolgedessen bauen sich die Eigenspannungen durch Plastizieren ab.

Helms et al. [49] haben den Sachverhalt hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit von Trägerversuchen folgendermaßen formuliert: „Bei einer Ermüdungsbeanspruchung nimmt der Einfluss der Lastmittelspannungen auf die Schwingfestigkeit von geschweißten Teilen mit zunehmenden Eigenspannungen erfahrungsgemäß ab. (...) Der beobachtete Effekt hat vermutlich seine

Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeitssteigerung durch Anwendung der Höherfrequenten Hämmerverfahren

Begründung darin, dass sich hohe Eigenspannungen in den meisten Fällen nach wenigen Lastwechseln soweit abbauen, dass die Last-Oberspannung als Summe aus Last-Mittelspannung und verbleibender Eigenspannung durch die zyklische Fließgrenze begrenzt wird. Dadurch wird das Bauteil unabhängig von der Höhe der Lastmittelspannungen (sofern die Eigenspannungen eine Mindestgröße nicht unterschreiten) immer in einem etwa gleichen Ausmaß mitelspannungsbeansprucht.“

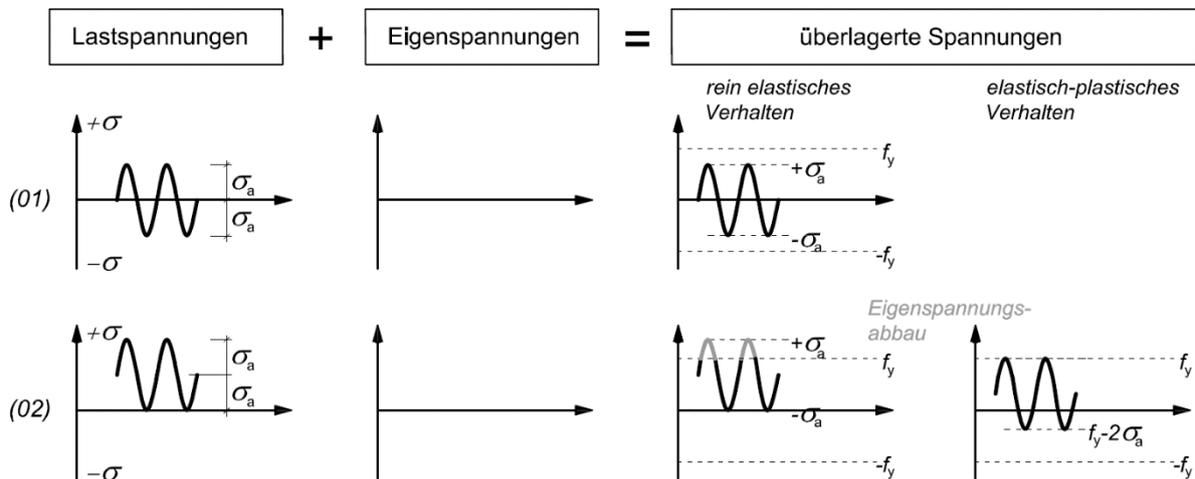


Abbildung 3-39: Erweiterung der Darstellung aus Abbildung 3-40 auf eigenspannungslose Bauteile für Wechselbeanspruchung (01), Zugschwellbeanspruchung (02) nach Theorie von Gurney [41]

Figure 3-39: Extension of visualization of Figure 3-40 of components without residual stresses for alternate loading (01) , pulsating tensional loading (02) according to theory of Gurney [41]

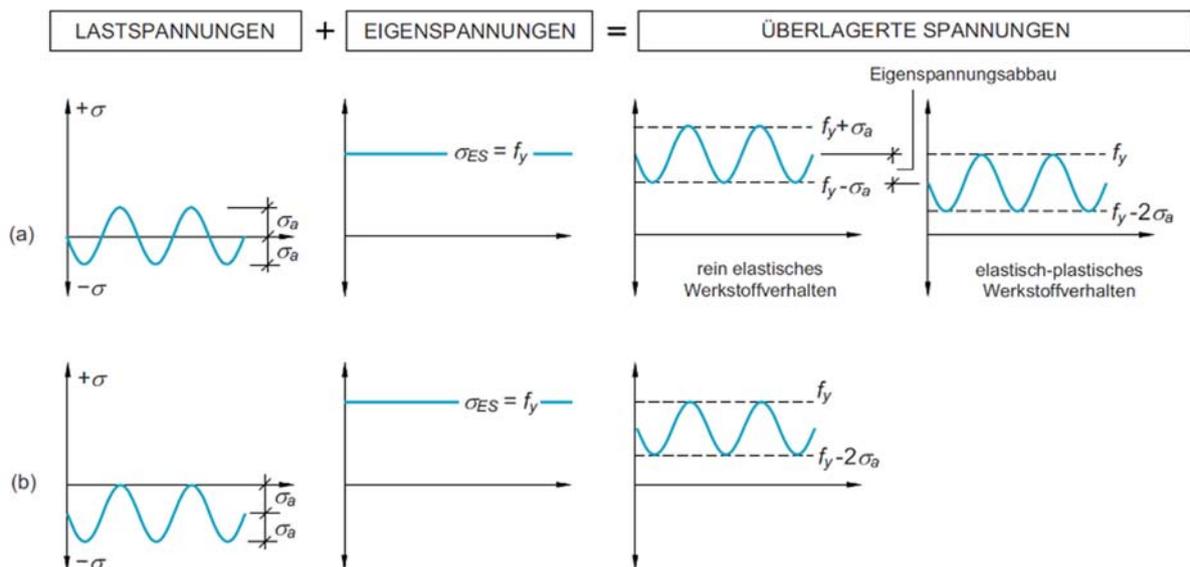


Abbildung 3-40: Überlagerung von Last- und Eigenspannungen für wechselbeanspruchte (a) und druckschwellbeanspruchte (b) geschweißte Bauteile aus [63] nach Theorie von Gurney [41]

Figure 3-40: Superposition of loading- and residual stresses for alternate loaded (a) and pulsating compressive (b) loaded welded components from [63] according to theory of Gurney [41]

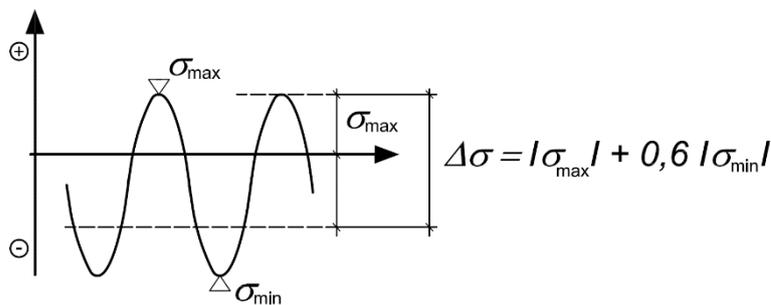
Es sei bemerkt, dass die Abbildung 3-39, Abbildung 3-40 und Abbildung 3-42 auf Vereinfachungen beruhen, siehe [41]. Ein wesentlicher Aspekt ist die Vernachlässigung der Kerbspannung, es werden also keine Spannungskonzentrationen berücksichtigt, sondern von einer konstant über den Querschnitt verteilten Spannung ausgegangen. In der Realität liegen jedoch vor allem am Kerbgrund erhöhte Spannungen vor. Die Abbildungen zeigen demnach nur Nennspannungsbetrachtungen unter Berücksichtigung des vorliegenden Eigenspannungswerts im vorliegenden Bauteil. Detailliertere Erläuterungen finden sich in [3].

3.5.2 Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses bei der Ermüdungsfestigkeitsbemessung nach DIN EN 1993-1-9 [16]

3.5.2 Consideration of the mean stress effects within fatigue assessment according to DIN EN 1993-1-9 [16]

Die Ermüdungsfestigkeitsbemessung nach DIN EN 1993-1-9 [16] sieht, aufgrund der im vorangehenden Kapitel zusammengefassten Erkenntnisse aus dem vorausgehenden Kapitel, nur in speziellen Fällen eine begünstigende Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses vor. So darf die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{E,2}$ von nicht geschweißten und spannungsarm geglühten Konstruktionen unter Druckspannungen modifiziert werden.

Die modifizierte Spannungsschwingbreite ergibt sich in diesem Fall aus der maximal einwirkenden Zugspannung + 60 % der Druckspannung, siehe Abbildung 3-41. Der Mittelspannungseinfluss findet demnach auf der Einwirkungsseite Berücksichtigung.



Legende

- + Zugspannungen
- Druckspannungen

Abbildung 3-41: Auszug aus DIN EN 1993-1-9 [16] zur Ermittlung der modifizierten Spannungsschwingbreite bei nicht geschweißten und spannungsarm geglühten geschweißten Konstruktionen

Figure 3-41: Extract from DIN EN 1993-1-9 [16] for determining the modified stress range on not welded and stress-relief annealed constructions

3.5.3 Mittelspannungseinfluss bei HFH-nachbehandelten Konstruktionsdetails

3.5.3 Mean stress effect for HFMI-treated construction details

Da durch eine HFH-Nachbehandlung Druckeigenspannungen an der Schweißkerbe am Nahtübergang eingebracht werden, liegen nicht mehr wie im Schweißzustand-belassenen Fall, negative Zugeigenspannungen vor. Jedoch führen auch in diesem Fall die Überlagerungen beider Spannungsanteile aus Eigenspannungszustand und Beanspruchung zu einem Eigenspan-

nungsabbau. Auch hier wäre nach Theorie nach Gurney [41] kein Einfluss auf die Ermüdungs-
festigkeit durch die Variation der aufgebrachtten Mittelspannung, wie Abbildung 3-42 zeigt, zu
erwarten, siehe [3].

Jedoch lässt sich deutlich erkennen, dass sich die Mittelspannung der überlagerten Spannungen
durch die positiv wirkenden Druckeigenspannungen vorwiegend in den unkritischeren
Druckspannungsbereich verschiebt. [3]

Prinzipiell haben Ermüdungsversuche an HFH-behandelten Probekörpern unter variierendem
Spannungsverhältnis gezeigt, dass eine Mittelspannungsabhängigkeit besteht. Jedoch ist die
Datengrundlage der Ermüdungsversuche mit variierenden Spannungsverhältnissen für ein-
zelne Konstruktionsdetails und verschiedene Stahlgüten im HFH-behandelten Zustand noch
ausbaufähig.

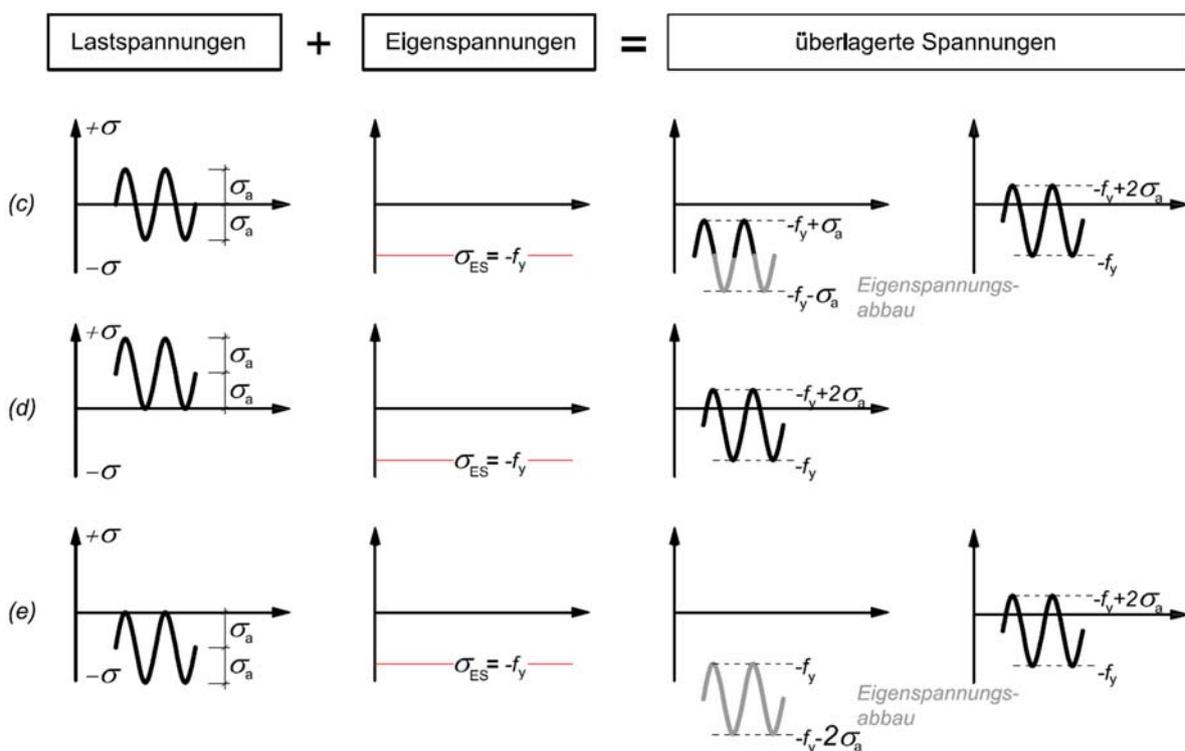


Abbildung 3-42: Erweiterung der Darstellung nach [3] aus Abbildung 3-40 auf geschweißte Bauteile unter Druckeigenspannungen in Höhe der Streckgrenze für Wechselbeanspruchung (c), Zugschwellbeanspruchung (d) und Druckschwellbeanspruchung (e) nach Theorie von Gurney [41]

Figure 3-42: Extension of visualization according to [3] of Figure 3-40 of welded components under compressive residual stress for alternate loading (c) , pulsating tensional loading (d) and pulsating compressive loading (e) according to theory of Gurney [41]

In den beschriebenen Bemessungsansätzen nach Dürr [30], Weich [99] / Refresh [90] und den IIW-Empfehlungen [68] findet der Mittelspannungseinfluss nur bei Spannungsverhältnissen $R \geq 0,1$ Beachtung. Dies ist vor allem auf die geringe Anzahl von Versuchsergebnissen für $R < 0,1$ zurückzuführen. Untersuchungen von Dürr und Weich haben gezeigt, dass die Ermüdungsfestigkeit bei $R < 0,1$ deutlich höher ist. Die Versuchsserie zum Mittelspannungseinfluss umfasst daher sowohl Träger- als auch Kleinprüfkörperversuche. Mit den in diesem Kapitel

durchgeführten Versuchen wird ermöglicht die mit abnehmendem Spannungsverhältnis zunehmende Ermüdungsfestigkeitssteigerung weiter zu quantifizieren.

3.5.4 Experimentelle Untersuchungen zum Mittelspannungseinfluss ($R = -1$)

3.5.4 Experimental investigations on mean stress influence ($R = 0.1$)

3.5.4.1 Ermüdungsversuche an Kleinprüfkörpern zum Mittelspannungseinfluss

Zur Untersuchung des Mittellasteinflusses werden Ermüdungsversuche unter Wechselbeanspruchung bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = -1$ durchgeführt. Es werden zwei Versuchsserien mit Quersteifen in den Zuständen „wie geschweißt“ (aw) und HFH-behandelt (HFH) geprüft. In 3.5.4.9 werden diese Ergebnisse den Ergebnissen der Trägerversuche zum Mittellasteinfluss gegenübergestellt. Die Beanspruchungen sowie die erreichten Lastspielzahlen der Ermüdungsversuche sind im Anhang C detailliert dargestellt.

Bei der Versuchsdurchführung am KIT sind die Quersteifen im Zustand aw im Ermüdungsversuch prüfbar. Die HFH-behandelten Proben erreichen sehr hohe Ermüdungsfestigkeiten und die ersten Proben weisen überwiegend Brüche im Grundmaterial auf, Abbildung 3-43.



Abbildung 3-43: HFH-behandelte Quersteife mit Ermüdungsriss im Grundmaterial, $R = -1$

Figure 3-43: HFMI-treated transverse attachment with fatigue crack in basic material, $R = -1$

Um die Ermüdungsfestigkeit der HFH-behandelten Schweißnaht beim Spannungsverhältnis $R = -1$ prüfen zu können, ist eine Modifikation der Prüfkörper erforderlich. Als Maßnahme werden die Quersteifen im Prüfbereich tailliert, wobei der Übergang in Form einer Klothoide ausgeführt wird. Der gesamte Prüfkörper wird gekürzt, für das Taillieren auf der Fräse ist zusätzlich die Steife zu kürzen. Die Abmessungen der taillierten Prüfkörper sind in Abbildung 3-44 gegeben.

Durch das Taillieren der Prüfkörper wird erreicht, dass das Versagen am HFH behandelten Nahtübergang auftritt. In Abbildung 3-45 erfolgt die Gegenüberstellung der Quersteife im ursprünglichen und im taillierten Zustand. Darüber hinaus zeigt Abbildung 3-45 das Versagen eines taillierten HFH-behandelten Prüfkörpers.

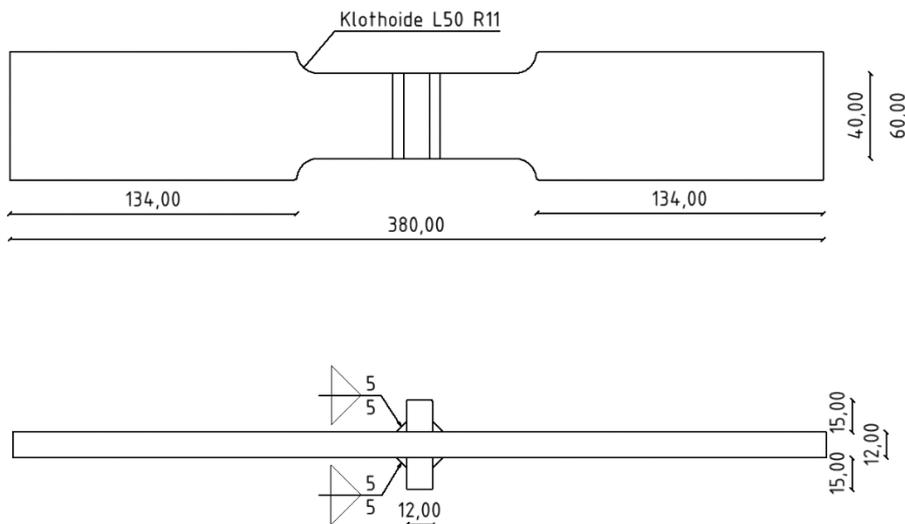


Abbildung 3-44: Abmessungen der taillierten Kleinprüfkörper

Figure 3-44: Dimensions of waisted small scale specimens



Abbildung 3-45: Quersteife tailliert und nicht tailliert (links), Ermüdungsriss am HFH-behandelten Nahtübergang eines taillierten Prüfkörpers (rechts)

Figure 3-45: Small scale specimens in waisted and original condition (left side), fatigue crack at HFMI-treated weld toe of a waisted specimen (right side)

Die Auswertung der Versuchsergebnisse beider Serien aus Tabelle 4 erfolgt nennspannungsba-
siert in Abbildung 3-46. Die Ergebnisse der taillierten Proben sind gelb eingefärbt. Aufgrund
der geringen Streuung der HFH-behandelten Proben werden die Prüfkörper, die einen Grund-
materialbruch aufweisen (blau eingefärbt), mit ausgewertet. Im Zustand aw (schwarz strichliert
dargestellt) beträgt die ermittelte Ermüdungsfestigkeit bei $N_c = 2 \cdot 10^6$ Lastspielen
 $\Delta\sigma_c = 122,6 \text{ N/mm}^2$. Diese liegt um 23 % höher als bei den zugschwellend geprüften Querstei-
fen und die Neigung verläuft mit einem Wert von $m = 4$ flacher. Der nach EC 3 Teil 1-9 [16]
anzusetzende Kerbfall 80 (rot dargestellt) liegt deutlich auf der sicheren Seite.

Die HFH-behandelten Quersteifen erreichen eine sehr hohe Ermüdungsfestigkeit von
 $\Delta\sigma_c = 306,3 \text{ N/mm}^2$ (grün strichliert dargestellt). Die Wöhlerlinie verläuft mit einer Neigung von
 $m = 8,1$ deutlich flacher als im Zustand aw. Die Ergebnisse der HiFIT- und PIT-behandelten
Quersteifen werden gemeinsam ausgewertet. Im HFH-behandelten Zustand ergibt sich eine
um 150 % höher Ermüdungsfestigkeit als im Zustand aw. Im Vergleich mit dem Kerbfall 80 des
EC 3 wird die Ermüdungsfestigkeit durch die HFH-Behandlung um 282 % gesteigert. Anzumer-
ken ist, dass ein Versagen der Prüfkörper erst bei Beanspruchungen in Höhe der Nennstreck-
grenze des Grundwerkstoffes $f_{y,nom} = 355 \text{ N/mm}^2$ beobachtet wird.

Zum Vergleich ist die Bemessungswöhlerlinie der IIW Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißnähte [66] (HFMI IIW Recommendations) dargestellt (grau dargestellt). Für Quersteifen aus S355 ist bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ die FAT-Klasse 140 anzusetzen und die Wöhlerlinienneigung zu $m = 5$ zu modifizieren. Dies führt zu einem sehr konservativen Bemessungsvorschlag für diese Versuchsserie.

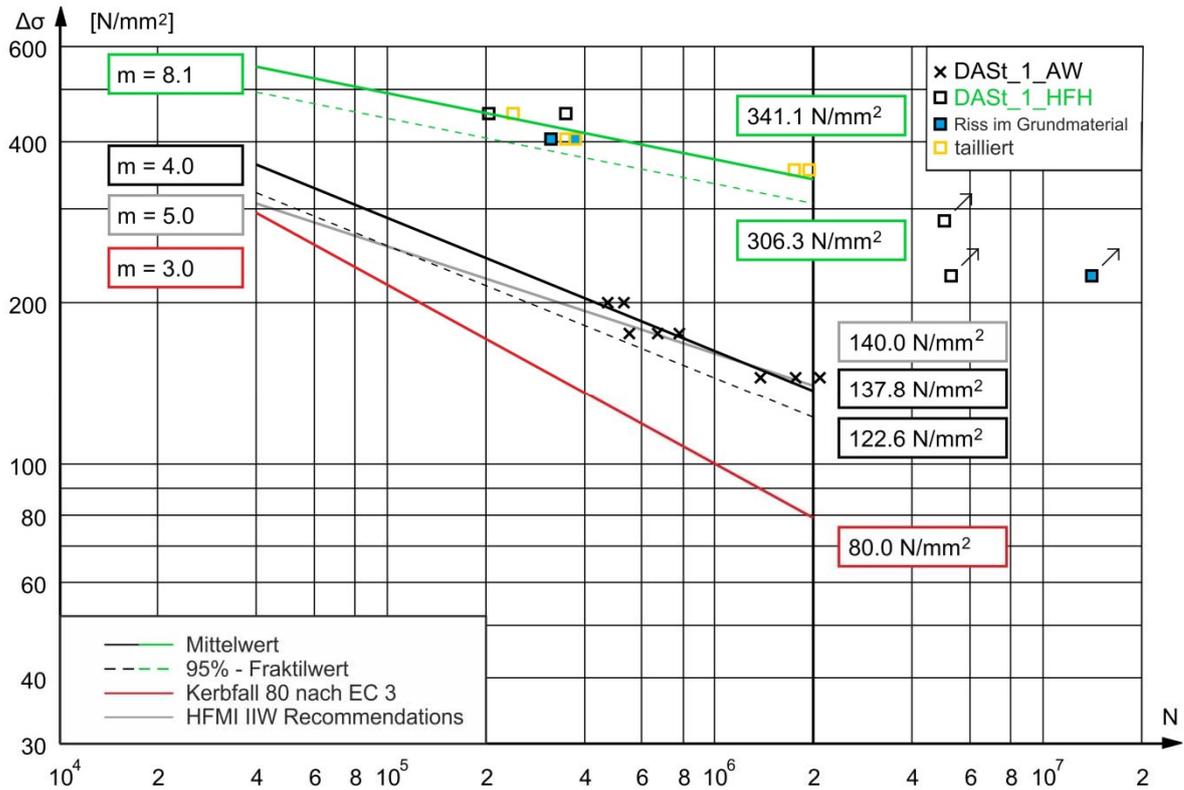


Abbildung 3-46: Nennspannungswöhlerlinien für die Quersteife: Zustand aw (DAST_1_AW) und HFH-behandelt (DAST_1_HFH), $R = -1$

Figure 3-46: S-N curve for nominal stress of transverse attachment: Aw condition (DAST_1_AW) and HFMI-treated condition (DAST_1_HFH), $R = -1$

3.5.4.2 Ermüdungsversuche an Trägerversuchen zum Mittelspannungseinfluss ($R = -1,0$)

3.5.4.3 Planung und Versuchskörperfertigung der Trägerversuchsreihe T1 ($R = -1,0$)

Die Ausführungszeichnungen und Dokumentation der Fertigung der Trägerversuchsreihe T1 können Anhang B, sowie detailliertere Informationen zur Trägerserie T1 [3] entnommen werden.

3.5.4.4 Nachbehandlung der Trägerversuchsreihe T1 ($R = -1,0$)

Wie bereits bei den Versuchskörpern der Serie T2 wurde die Hälfte der HFH-behandelten Träger mit dem PIT-Verfahren und die andere Hälfte mit dem HiFIT-Verfahren nachbehandelt.

Es wurden zunächst nur die Schweißnahtübergänge an beiden Flanschen der eingeschweißten Quersteifen behandelt. Nachdem der erste Versuchsträger (T1.1 – PIT) direkt am Ausrundungsradius versagte wurden alle weiteren Versuchskörper auch am Steg (T1.3, T1.4, T1.5 und T1.6) nachbehandelt. Die Dokumentation der Nachbehandlung der Trägerserie T1 ist in Anhang B enthalten.

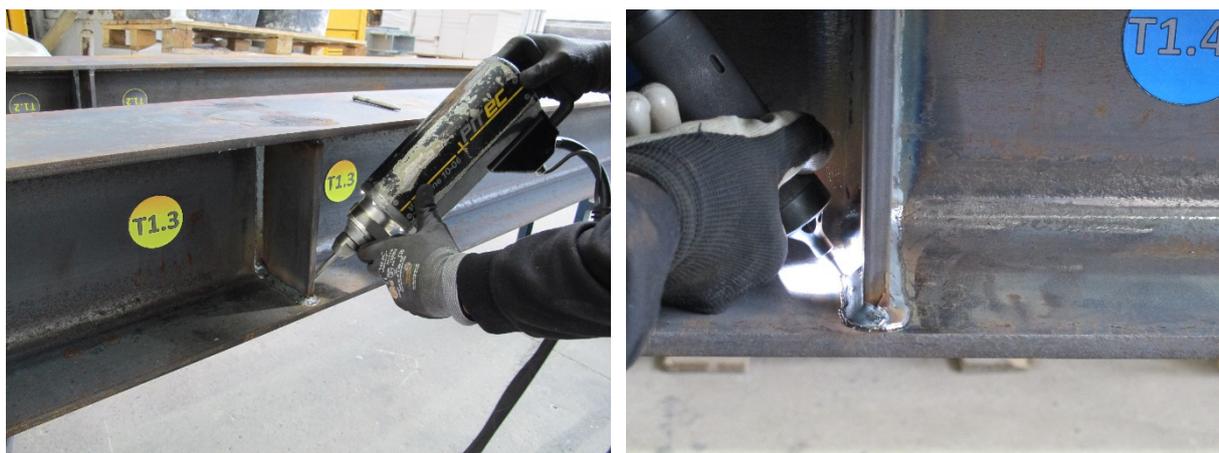


Abbildung 3-47: Nachbehandlung durch die Firmen *Pitec GmbH* und *Dynatec GmbH*

Figure 3-47: Post-treatment realized by *Pitec GmbH* and *Dynatec GmbH*

3.5.4.5 Versuchsaufbau und -durchführung der Trägerversuchsreihe T1 ($R = -1,0$)

Die Belastung bei den Trägerversuchen wird mittels Schwingmotoren aufgebracht, die den Träger durch deren Unwucht anregen. Für die in Feldmitte befindliche Quersteife kann so durch den Druck- / Zugwechsel das Spannungsverhältnis $R = -1$ realisiert werden. Abbildung 3-48 und Abbildung 3-49 zeigen das Schema des Versuchsaufbaus. Dieser besteht im Wesentlichen aus den folgenden drei Komponenten: zwei Auflagerböcke mit Gummilager, zwei Schalungsrüttler und der Steuerung der Schalungsrüttler.

Die Schalungsrüttler der Firma *Knauer Engineering Industrieanlagen GmbH & Co.KG* vom Typ VZ 400 (mit Unwuchtscheiben VZ 600) wurden mit HV-Verbindungen an den Träger geschraubt und mit einem Drehmoment entsprechend der Betriebsanleitung jeweils auf 900 Nm angezogen. Die Auflagerböcke wurden von der Firma *Knauer Engineering Industrieanlagen GmbH & Co.KG* dimensioniert und gefertigt. Die zylinderförmigen Elastomerlager sorgen für

eine Dämpfung des Systems. Die Schalungsrüttler werden normalerweise im Betonfertigteilbau verwendet und dienen dort als Verdichtungsrüttler.

Ursprünglich sollten die nach Zeichnung aus Anhang B vorgefertigten 4 m langen Versuchskörper mithilfe von Adaptern auf eine Länge von 6 m verlängert werden um die Steifigkeit der Systems zu verringern. Die Adapter hätten jedoch zusätzliche Kerben (ob Schweißnähte oder Schraubverbindungen) in einem hoch-ermüdungsbeanspruchten Bereich bedeutet, so dass man sich auch aus wirtschaftlicher Sicht kurzfristig dazu entschieden hat, neue 6 m lange Träger aus S355 zu bestellen und Steifen einzuschweißen. Hier wurde die Möglichkeit genutzt und noch zwei zusätzliche Träger bestellt, um darüber hinaus noch mehr Versuchsdaten zu bekommen.

Über eine stufenlose Regelung der Steuerung, an der die beiden Schalungsrüttler angeschlossen sind, kann die Drehzahlvariation der Unwuchtscheiben vorgenommen werden (siehe Abbildung 3-52).



Abbildung 3-48: Schema - Draufsicht Versuchsaufbau [3]

Figure 3-48: Scheme - top view on test setup [3]

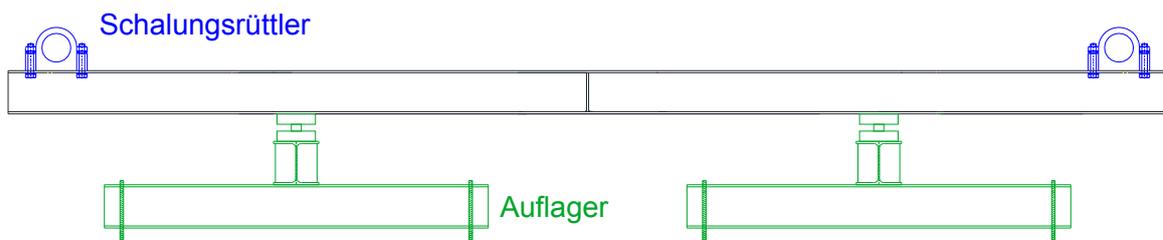


Abbildung 3-49: Schema - Ansicht Versuchsaufbau [3]

Figure 3-49: Scheme - elevation on test setup [3]

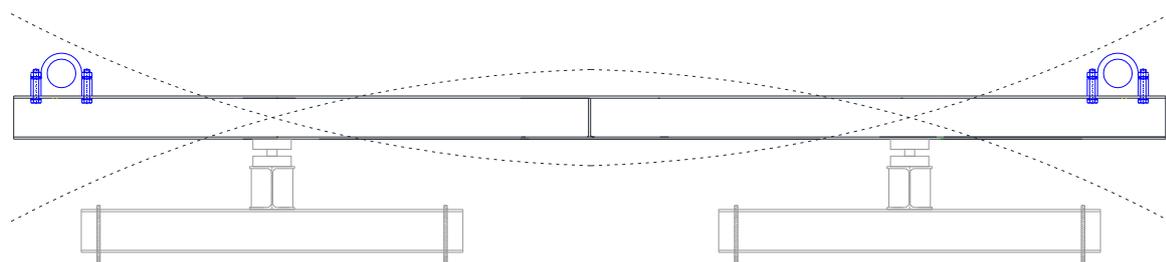


Abbildung 3-50: Erzeugte Biegelinie infolge Aktivierung von Schalungsrüttler [3]

Figure 3-50: Generated bending line by activating external vibrators [3]

Voraussetzung für das Erreichen der gewünschten Biegelinie (siehe Abbildung 3-50) war die Synchronisierung der gegenläufigen beiden Unwucht Scheiben. Nur durch das synchrone Schwingen der beiden Unwuchtscheiben bleiben unerwünschte Horizontalkräfte aus und es entsteht eine vertikale Biegelinie. Lediglich im Fall der Abschaltung der Steuerung liefen die Unwuchtscheiben auseinander und eine asymmetrische Biegelinie des Trägers konnte beobachtet werden. Die Herleitung der benötigten Frequenz sowie eine dynamischen Berechnung kann [3] entnommen werden.

Die Versuchsdurchführung wurde protokolliert, die Protokolle der Trägerversuchsserie T1 können Anhang D bzw. [3] entnommen werden.



Abbildung 3-51: Schalungsrüttler der Firma *Knauer Engineering Industrieanlagen GmbH & Co.KG* [3]

Figure 3-51: External vibrator from *Knauer Engineering Industrieanlagen GmbH & Co. KG* [3]



Steuerungsgerät und Regler
der Drehzahl

Stufenlose Regelung der
Drehzahl

Gummilager zur Ermöglichung einer
zwangsarmen frei-frei-Lagerung

Abbildung 3-52: Schalungsrüttler der Firma *Knauer Engineering Industrieanlagen GmbH & Co.KG* [3]

Figure 3-52: External vibrator from *Knauer Engineering Industrieanlagen GmbH & Co. KG* [3]

3.5.4.5.1 Messtechnik

Die Versuchsträger wurden mit mindestens zwei Dehnmessstreifen (DMS) und jeweils einem Wegaufnehmer (WA) in Feldmitte des Trägers bestückt, siehe Abbildung 3-53. Aufgrund der hohen Prüfgeschwindigkeit und der damit einhergehenden Belastung, wurde auf ein älteres Modell des Wegaufnehmers zurückgegriffen, dieser diente hauptsächlich dem Zweck die Lastwechselzahlen zu dokumentieren. In den meisten Fällen war die dynamische Beanspruchung für die DMS zu hoch, so dass nach einer gewissen Lastspielzahl ein Kabelbruch eintrat. Allerdings blieb bei allen Versuchskörpern mindestens eine DMS intakt, so dass bis zum Versuchsende die Dehnungen aufgenommen werden konnten. Die Nenndehnung konnte somit während des gesamten Versuchsablaufs dokumentiert werden. Diese Nenndehnungen wurden in diesem Fall berechnet durch diese global aufgebrachte Dehnmessstreifen.

3.5.4.5.2 Abbruchkriterium

Durch die hohe Prüfgeschwindigkeit und dem daraus resultierenden schnellen Risswachstum und die Sensibilität des Prüfverfahrens auf eine Frequenzänderung wurde das Versuchsende auf eine sichtbare Risslänge mit maximal ca. 5 – 6 cm beschränkt.

Beispielsweise wurde die Sensibilität von Störungen des Systems durch Rissbildung, durch einen Trägerversuch der nur auf einer Seite des Steges einen Riss erhielt offensichtlich.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Mittelspannungseinfluss durch Resonanzprüfverfahren in [3] traten Fragen hinsichtlich des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit auf. [3] enthält Informationen zum Einfluss der Prüffrequenz auf die Ermüdungsfestigkeit.

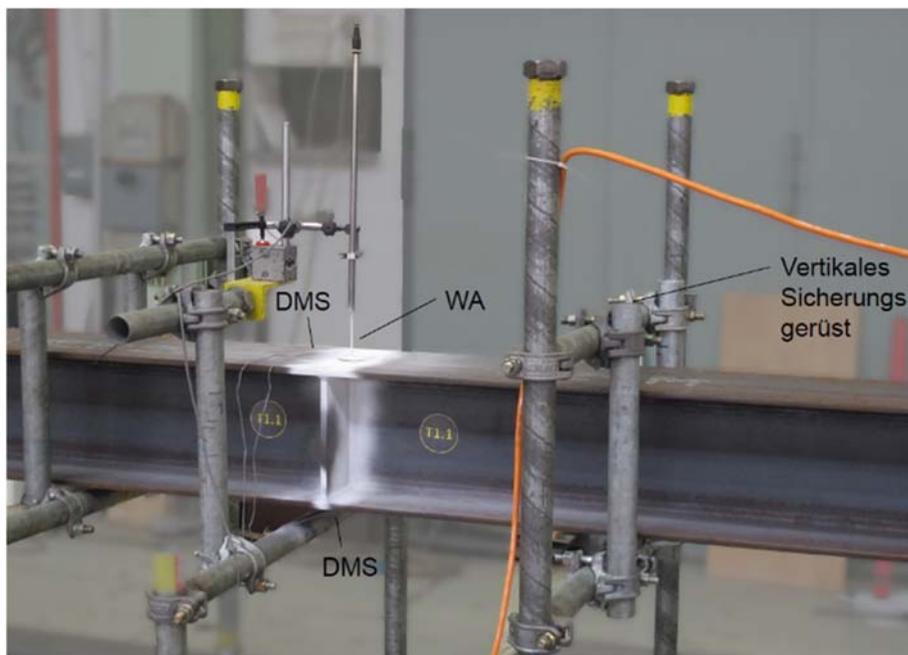


Abbildung 3-53: Messtechnik bei der Versuchsdurchführung [3]

Figure 3-53: Measurement while test execution [3]



Abbildung 3-54: Versuchsaufbau [3]

Figure 3-54: Test setup [3]

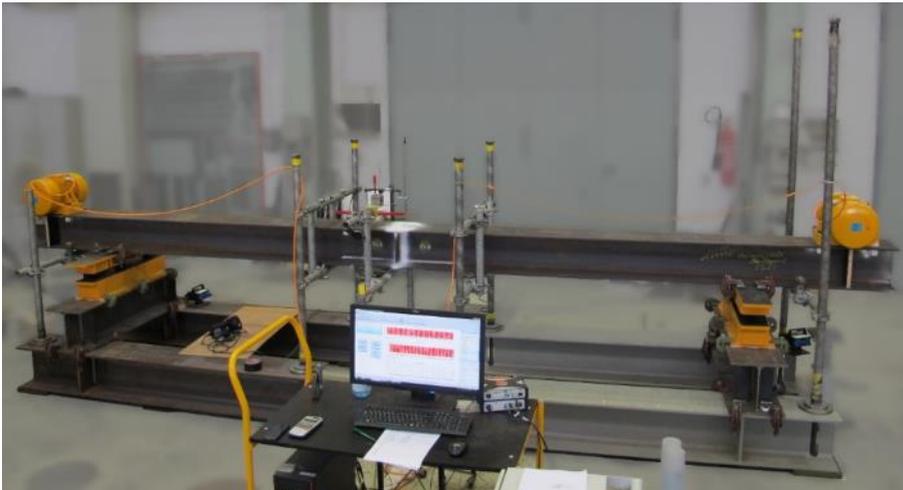


Abbildung 3-55: Messeinheit mit Versuchsaufbau [3]

Figure 3-55: Measuring unit with test setup [3]

3.5.4.6 Rissbild der Trägerversuchsreihe T1 ($R = -1,0$)

Bei drei der acht getesteten Trägerversuche unter Wechselbeanspruchung stellte sich das erwartete Rissbild entlang der Quersteifennaht am Unter- bzw. Obergurt ein, vgl. Abbildung 3-57. Zwei Versuchsträger versagten am Schweißnahtübergang der Steife zum Steg, siehe Abbildung 3-56. In beiden Fällen wurde die Nachbehandlungsspur nicht ausreichend weit in den Steg geführt, so dass sich die Risse direkt oberhalb der nachbehandelten Stelle bildeten. Ein weiterer Träger versagte am Gurt des Trägers, so dass man hier von einem Grundmaterialbruch sprechen kann. In Anhang D sind exakte Angaben zur Versuchsdurchführung in Form der Versuchsprotokolle der Trägerserie 1 dokumentiert.



Abbildung 3-56: Rissbildung bei unzureichender Nachbehandlung am Steg [3]

Figure 3-56: Crack initiation through insufficient post-treatment at the web [3]



Abbildung 3-57: Typische Rissbildung an Untergurtschweißnaht [3]

Figure 3-57: Typical crack initiation at the welding on the bottom chord [3]

3.5.4.7 Versuchsergebnisse der Trägerversuchsreihe T1 ($R = -1,0$)

Tabelle 11 zeigt die Versuchsergebnisse zusammengefasst unter Angabe der erreichten Lastwechselzahlen und Nennspannungsschwingbreite, sowie der zugehörigen Prüffrequenz. Die Nennspannungen wurden über die global aufgebrachten Dehnmessstreifen unter Annahme eines Elastizitätsmoduls von $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$ bestimmt. Für die Ermittlung der Nennspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ wurden die maximal und minimal dokumentierten Dehnungen des DMS der Stelle 1 betragsmäßig summiert, multipliziert mit dem Elastizitätsmodul E . Durch Multiplikation dieser Biegeendspannungsschwingbreite mit dem Faktor 0,9 (siehe Abbildung 3-26) erhält man die Spannungsschwingbreite für die Lage des Quersteifennaht-Übergangs.

Ergänzende Bemerkungen zum Rissausgangsort können Tabelle 11 entnommen werden. Zwei HFH-nachbehandelte Träger erreichten bis zur Anzahl von 3 Millionen Lastwechsel keinen Anriss, so dass diese als Durchläufer zu behandeln sind.

Sowohl durch das Prüfverfahren der Resonanzregung an sich als auch durch die leichte Abweichungen der Versuchskörpergeometrien entlang des Trägers kam es zu leichten Abweichungen der exakt gewünschten Wechselbeanspruchung $R = -1,0$.

Das Prüfverfahren durch Resonanzregung lässt eine weniger exakte Steuerung der aufzubringenden Beanspruchung zu, als es beispielsweise beim Prüfportal mit servo-hydraulisch kraft- oder weggesteuerten Zylindern heutzutage möglich ist. Das Prüfverfahren reagiert prinzipiell sehr empfindlich gegenüber Abweichungen der soll-Trägergeometrie. Das hat sich am Beispiel des Trägerversuch T1.5 gezeigt. Aufgrund eines Anrisses im Obergurt veränderte sich bei der Versuchsdurchführung rasch die Frequenz, das Prüfgeräusch und die Biegelinie.

Durch die Sensibilität des Prüfverfahrens gegenüber Toleranzen des Trägers können deshalb Abweichungen am Spannungsverhältnis entstanden sein, diese liegen jedoch, wie aus Tabelle 11 erkenntlich wird, in meisten Fällen im Rahmen.

Abbildung 3-58 zeigt die Versuchsergebnisse der unbehandelten und behandelten Trägerversuche im Wöhlerdiagramm aufgeschlüsselt nach deren Nachbehandlungszustand. Die erreichten Lastwechselzahlen der beiden unterschiedlichen Nachbehandlungsverfahren unterscheiden sich unwesentlich. Der Einfluss des nachbehandelten zum unbehandelten Zustand wird deutlich.

Wie auch bei Trägerserie T2 sind in diesem Diagramm zum Vergleich die Wöhlerlinien aus DIN EN 1993-1-9 für den unbehandelten Zustand der unbelasteten Quersteife mit $\Delta\sigma_c = 80 \text{ N/mm}^2$ und die Wöhlerlinie eines unverschweißten Grundwerkstoffs mit $\Delta\sigma_c = 160 \text{ N/mm}^2$ gegeben. Die Verbesserung durch die HFH-Anwendung wird deutlich, jedoch ist festzustellen, dass selbst die Ergebnisse der unbehandelten Träger im Vergleich zum unbehandelten Referenzfall sehr hohe Lastwechselzahlen erreichen.

Tabelle 11: Versuchsergebnisse Trägerversuche T1 (R = -1,0) und modifizierte Nennspannungsschwingbreite nach DIN EN 1993-1-9 [16] aus [3]

Table 11: Test results of girder test serie T1 (R = -1.0) and modified nominal stress range according to DIN EN 1993-1-9 [16] from [3]

Bezeichnung	Zustand	Prüffrequenz [Hz]	Max. & min. Dehnungen Stelle 1 (DMS1) [$\mu\text{m/m}$]	Nennspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm^2]	Lastwechsel N [-]	Modifizierte Nennspannungsschwingbreite (60% σ_{\min})	Bemerkung
VT1	aw		+660/-660	250	250.000	200	NÜ
VT2	aw		+520/-560	205	600.000	162	NÜ
T1.1	PIT	34,5	+600/-720	250	1.185.637	195	NÜ Steg
T1.2	PIT	35,1	+800/-800	300	708.640	242	NÜ Steg
T1.3	PIT	34,5	+670/-680	255	3.000.000	204	DL
T1.4	HiFIT	34,0	+530/-630	219	3.000.000	172	DL
T1.5	HiFIT	34,7	+850/-850	320	631.555	258	GM
T1.6	HiFIT	34,3	+650/-650	246	1.025.925	197	NÜ

- NÜ – Nahtübergangsriss auf Höhe der Flansche
- NÜ Steg – Nahtübergangsriss auf Höhe des Stegs (ungenügend weit in den Steg behandelt)
- DL – Durchläufer

- GM – Grundmaterialriss

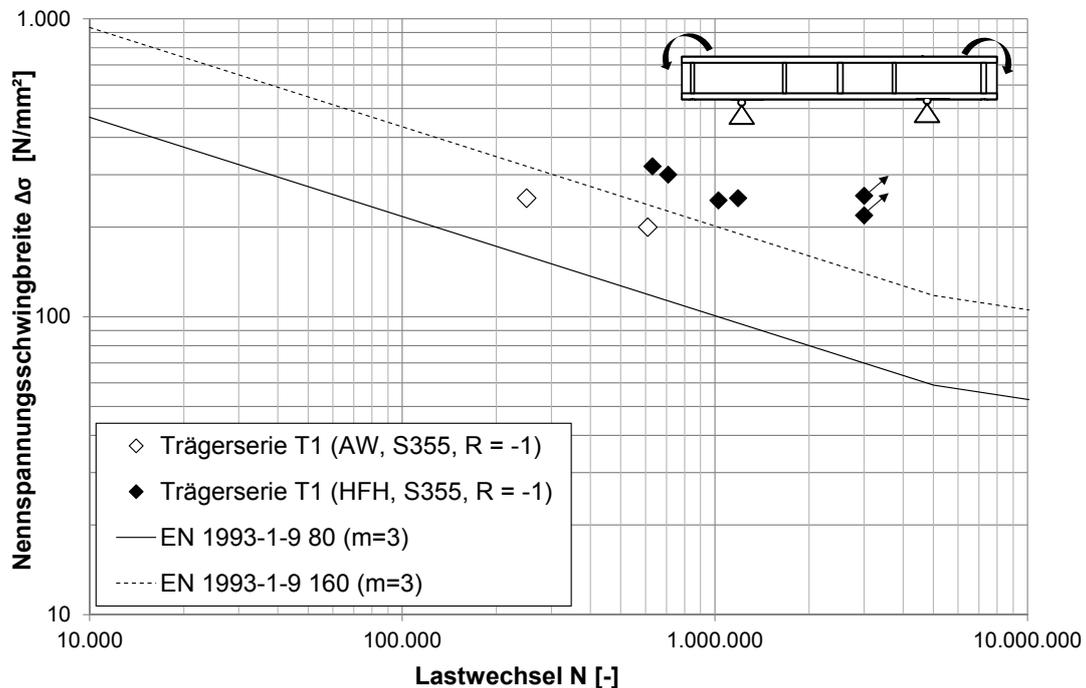


Abbildung 3-58: Versuchsergebnisse der Wechsellastversuche getrennt nach Nachbehandlungszustand [3]

Figure 3-58: Test results of the alternating load test separated by treatment state [3]

3.5.4.8 Auswertung der Versuchsergebnisse der Trägerversuchsreihe T1 (R = -1,0)

Zwei HFH-nachbehandelte Träger erreichten bis zur Anzahl von 3 Millionen Lastwechsel keinen Anriss, so dass diese als Durchläufer zu behandeln sind. So können 33% der HFH-nachbehandelten Versuchsergebnisse an den nachbehandelten Trägern nicht berücksichtigt werden. In der Folge liefert eine Auswertung mit vier HFH-nachbehandelten Trägerversuchsergebnissen mit einer variablen Neigung von $m = 2,2$ einen Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c = 147,6$ N/mm² (Stern). In Anbetracht der steilen Neigung wird offensichtlich, dass die Neigung alleine durch die geringe Anzahl der Versuche und die zwei nah bei einander liegenden Spannungsniveaus zu Stande kommt.

Eine alternative Auswertemethode bietet das Vorgehen, welches im Rahmen des Forschungsprojekts am KIT entwickelt wurde, siehe auch [88] bzw. [89]. So können mithilfe der entwickelten Methode Versuche, bei denen bis zum Ende Ihrer Laufzeit kein Anriss auftrat, mithilfe dieser Methode abgeschätzt werden und in der Auswertung berücksichtigt werden. Die statistische Auswertung der HFH-nachbehandelten Serie unter $R = -1,0$ zeigt, dass die Annahme einer Wöhlerlinienneigung von $m = 5$ angemessen ist.

Zwingt man, wie in Abbildung 3-60 der HFH-nachbehandelten Versuchsserie eine fixe Wöhlerlinienneigung von $m = 5$ auf, so ergibt sich die Ermüdungsfestigkeit zu $\Delta\sigma_c = 184,6$ N/mm (Stern).

Beim Vergleich der Trägerserie T1 (R = -1,0) zu T2 (R = 0,1) mit fest vorgegebener Regressionsneigung ergibt sich ein Verbesserungsfaktor unter Anwendung der Wechselbeanspruchung von 22 %.

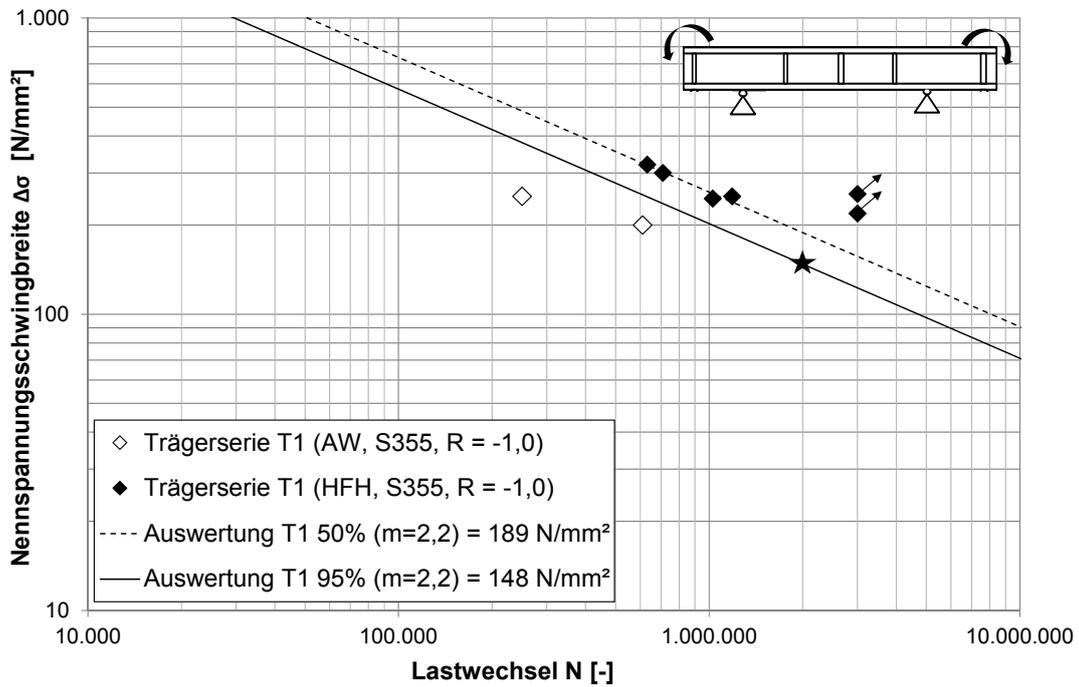


Abbildung 3-59: Auswertung der Ergebnisse der wechselbeanspruchten Trägerversuche R = -1,0 unter freier Neigung (m = 2,2) [3]

Figure 3-59: Evaluation of results from girder-tests with alternating stresses R = -1.0 with free slope (m = 2.2) [3]

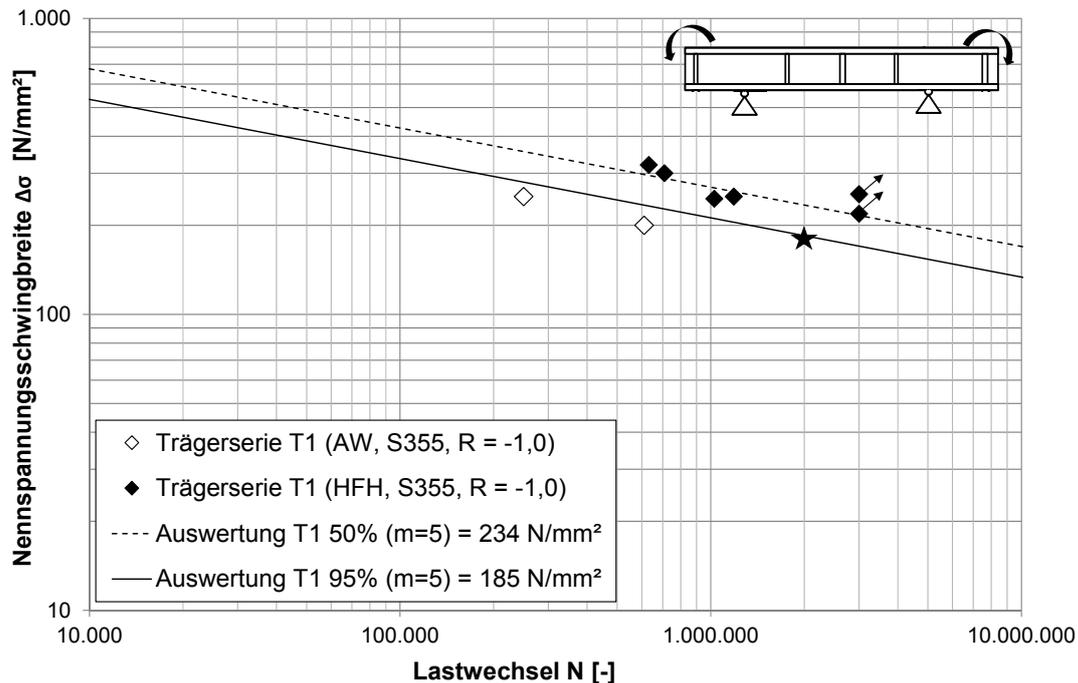


Abbildung 3-60: Auswertung der Ergebnisse derwechselbeanspruchten Trägerversuche R = -1,0 unter fixer Neigung (m = 5) [3]

Figure 3-60: Evaluation of results from girder-tests with alternating stresses R = -1.0 with fixed slope (m = 5) [3]

Im Rahmen von [3] wurde eine Modifizierung der Spannungsschwingbreiten gemäß DIN EN 1993-1-9 [16] Abschnitt 7.2.1 vorgenommen und die Spannungsschwingbreite der durchgeführten Versuche aus der Summe aus 100 % der Zugspannungen und nur 60 % der Druckspannungen nach Gleichung (3.7) berechnet. Es lässt sich erkennen, dass sich die Ergebnisse der Serien T1 und T2 im Wöhlerdiagramm annähern, siehe Abbildung 3-61. Die zugehörigen berechneten modifizierten Spannungsschwingbreiten sind in Tabelle 11, Spalte 7 aufgeführt.

$$\Delta\sigma = |\sigma_{max}| + 0,6 \cdot |\sigma_{min}| \quad (3.7)$$

Diese Modifizierung der Nennspannungsschwingbreite von druckbeanspruchten Konstruktionen gilt nach DIN EN 1993-1-9 [16] allerdings nur für nicht geschweißte oder spannungsarm geglühte geschweißte Konstruktionen. Das Spannungsarmglühen, kann hier gleichgesetzt werden mit der Anwendung von HFH-Verfahren auf den Schweißnahtübergängen, da auch hier ein Eigenspannungsabbau, bzw. ein geänderter, positiver Eigenspannungsverlauf entsteht.

Anhand des Diagramms in Abbildung 3-61 wird klar, dass die Modifizierung der Spannungsschwingbreite der Serie T1, wie in [3] beschrieben, die Differenz der beiden Serien verringert, jedoch scheint der positive Einfluss der geringeren Mittelspannung vor allem für die HFH-nachbehandelten Trägerversuche der Serie T1 noch etwas größer zu sein, als durch die Modifizierung erfasst werden konnte.

Hingegen erkennt man beim Vergleich der unbehandelten Serien, dass die Modifizierung die Versuchsergebnisse der Serie T1 leicht überschätzt. Das unterstreicht die sinnvolle Abgrenzung des zulässigen Anwendungsbereichs auf nur spannungsarmgeglühte oder nicht-geschweißte Konstruktionen in DIN EN 1993-1-9 [16].

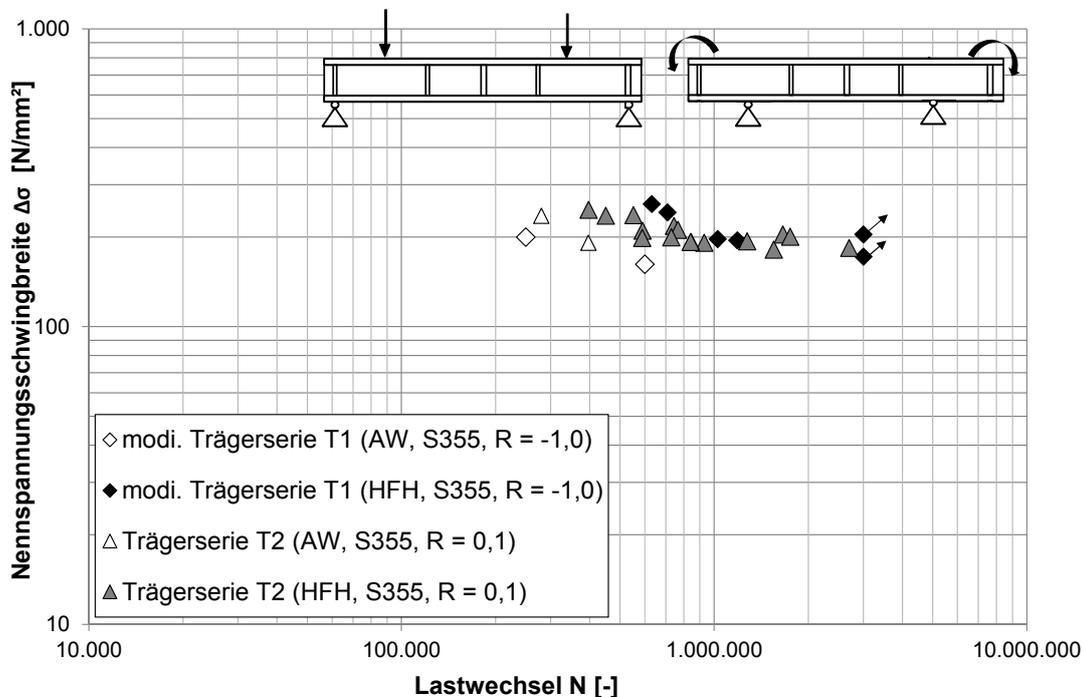


Abbildung 3-61: Gegenüberstellung der Trägerserien T1 und T2 unter Modifizierung der Spannungsschwingbreiten der Serie T1 [3]

Figure 3-61: Comparison of girder-series T1 and T2 with modification of stress range of series T1 [3]

Unter Berücksichtigung einer frei ermittelten Wöhlerlinienneigung ($m = 8,1$) erhält man eine Ermüdungsfestigkeit für die Kleinproben von $306,3 \text{ N/mm}^2$. Somit entspricht die Trägerversuchsfestigkeit 48 % der Kleinbauteilfestigkeit. Dieser Vergleich macht aufgrund der großen Abweichung der ermittelten freien Neigung in Zusammenhang mit der kleinen Stichprobenanzahl bei den Trägerversuchen keinen Sinn und verfälscht den Bauteileinfluss für die wechselbeanspruchten Versuchsserien.

Für die statistische Auswertung mit vorgegebener Wöhlerlinienneigung von $m = 5$ ergibt sich für die HFH-behandelte Kleinserie ein Bezugswert von $\Delta\sigma_c = 234,3 \text{ N/mm}$. Im Verhältnis zur mit fixer Neigung von $m = 5$ ausgewerteten Trägerserie ergibt sich für die Träger eine 79 % geringe Ermüdungsfestigkeit. Vergleiche zu weiteren Bauteilversuchen können [3] entnommen werden.

3.5.4.9 Gegenüberstellung der Träger- und Kleinversuchsreihe unter Wechselbeanspruchung

Die Gegenüberstellung der Auswertung der Ermüdungsfestigkeit der Trägerversuchsserie des KEs zur Kleinversuchsserie des KITs in Abbildung 3-62 zeigt, dass die Kleinversuchskörper im HFH-behandelten Zustand mit $\Delta\sigma_c = 306 \text{ N/mm}^2$ eine wesentlich höhere Ermüdungsfestigkeit erreichen als die Trägerserie T1 mit $\Delta\sigma_c = 185 \text{ N/mm}^2$. Zwar konnte in Kapitel 3.5.4.8 gezeigt werden, dass eine fixe Wöhlerlinienneigung von $m = 5$ für die Trägerversuchsreihe angemessen ist, jedoch führen die Kleinversuchsergebnisse zu einer sehr flachen freien Neigung von

$m = 8,1$, was in diesem Fall zu einer noch größeren Verbesserung führt. Demnach erreicht die Trägerserie lediglich 61 % der Ermüdungsfestigkeit der Kleinserie.

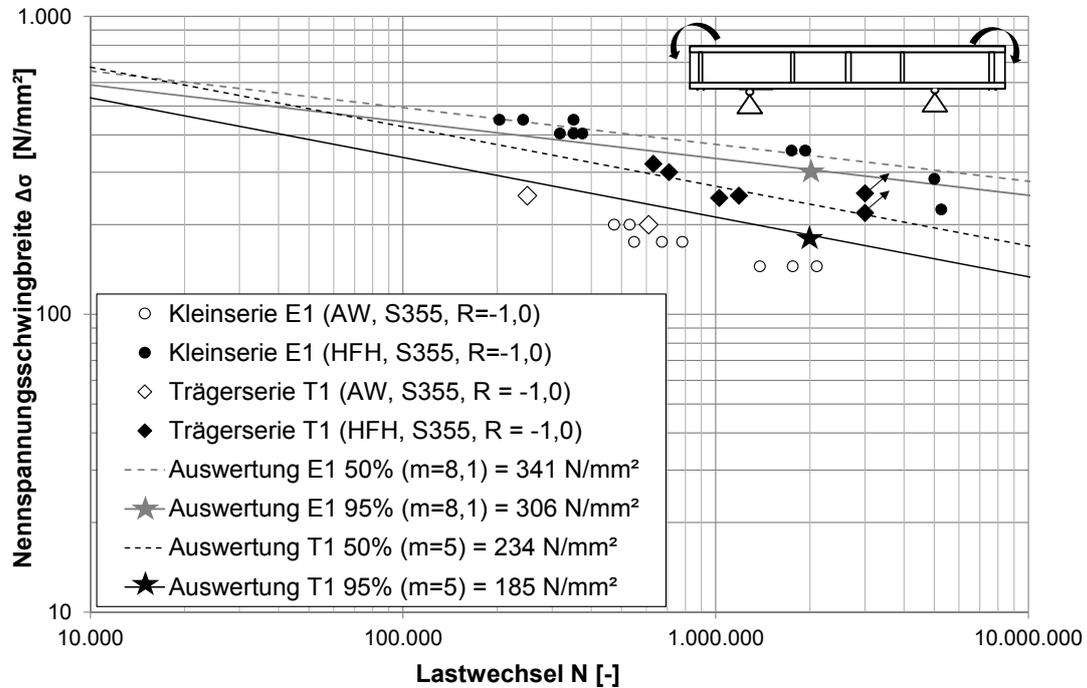


Abbildung 3-62: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse der Trägerserien T1 und Kleinversuchserie E1 [3]

Figure 3-62: Comparison of test results from girder test serie T1 and small scale series E1 [3]

3.6 Mehrstufige Belastung

3.6 Load

3.6.1 Allgemeines

3.6.1 General

Ein typisches Einsatzgebiet höherfrequenter Hämmerverfahren ist die nachträgliche Anwendung auf ermüdungsbeanspruchte Bauteile, die bereits eine Belastungsgeschichte erfahren haben. Aus diesem Hintergrund heraus soll durch versuchstechnische Untersuchungen an vorbelasteten Kleinprüfkörpern der Effekt einer HFH Nachbehandlung identifiziert werden.

3.6.1.1 Mehrstufige Belastung M1: Überlasten zugschwellend

Der Einflusses von zugschwellenden Überlasten wird an zwei Versuchsserien mit Quersteifen in den Zuständen „wie geschweißt“ (aw) und HFH-behandelt (HFH) untersucht. Dazu wird vor Ermüdungsversuchsbeginn ein Belastungsblock von 100 Lastspielen mit einer Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma = 402 \text{ N/mm}^2$ gemäß Abbildung 3-63 eingestreut. Diese Überlasten entsprechen 90 % der oberen Streckgrenze R_{eH} des Grundwerkstoffs. Exemplarisch ist die Aufzeichnung des Kraft-Maschinenweg-Diagramms einer Quersteife beim Aufbringen der Überlast in Abbildung 3-64 dargestellt.

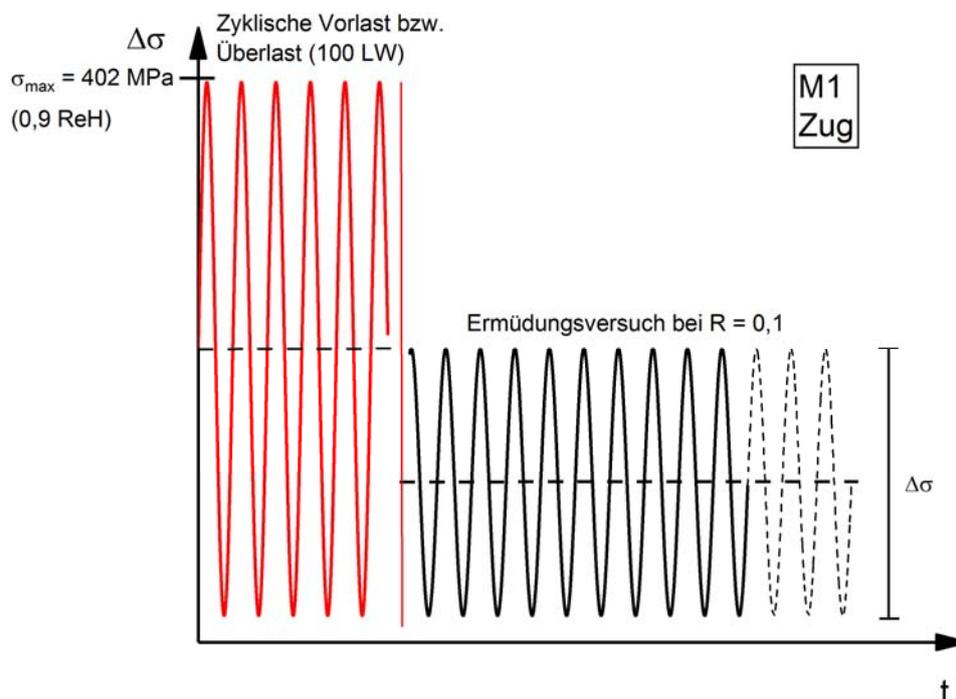


Abbildung 3-63: Lastfolge M1 – zugschwellende Überlasten vor Ermüdungsversuchsbeginn

Figure 3-63: Load sequence M1 – tensile overloads prior to fatigue testing

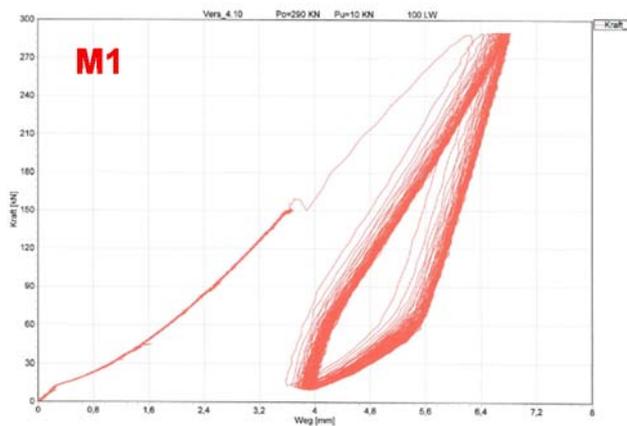


Abbildung 3-64: Lastfolge M1 – Kraft-Maschinenweg-Aufzeichnung

Figure 3-64: Load sequence M1 – force-displacement recording of testing rig

Nach Aufbringen der Überlasten werden die Prüfkörper aus der Universalprüfmaschine ausgebaut und auf der Resonanzprüfmaschine im Ermüdungsversuch bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ geprüft. Die Beanspruchungen sowie die erreichten Lastspielzahlen der einzelnen Ermüdungsversuche sind im Anhang C dargestellt.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse beider Serien aus Tabelle 4 erfolgt nennspannungsbasiert in Abbildung 3-65. Im Zustand aw (schwarz strichliert dargestellt) beträgt die ermittelte Ermüdungsfestigkeit bei $N_c = 2 \cdot 10^6$ Lastspielen $\Delta\sigma_c = 130,4 \text{ N/mm}^2$. Diese liegt um 30 % höher als bei den zugschwellend geprüften Quersteifen ohne Überlasten und die Neigung verläuft mit einem Wert von $m = 6,6$ deutlich flacher. Der nach EC 3 Teil 1-9 [16] anzusetzende Kerbfall 80 (rot dargestellt) liegt deutlich auf der sicheren Seite. Es ist davon auszugehen, dass diese hohe Ermüdungsfestigkeit infolge eines „Richtens“ der Quersteifen sowie dem daraus resultierenden Abbau von ungünstig wirkenden Zugeigenstressungen im Schweißnahtbereich erreicht wird.

Die HFH-behandelten Quersteifen erreichen eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 116,8 \text{ N/mm}^2$ (grün strichliert dargestellt) bei einer großen Streuung. Die Wöhlerlinie verläuft mit einer Neigung von $m = 3,5$ steiler als im Zustand aw. Die Ergebnisse der HiFIT- und PIT-behandelten Quersteifen werden gemeinsam ausgewertet. Insgesamt treten zwei Durchläufer im HFH-behandelten Zustand auf. Im Vergleich mit dem Kerbfall 80 des EC 3 wird die Ermüdungsfestigkeit durch die HFH-Behandlung um 46 % gesteigert. Anzumerken ist, dass die Einzelergebnisse HFH-behandelter Quersteifen deutlich über den Ergebnissen im Zustand aw liegen, die ermittelte Ermüdungsfestigkeit aufgrund der vorliegenden Streuung jedoch geringer ist.

Zum Vergleich ist die Bemessungswöhlerlinie der IIW Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißnähte [68] (HFMI IIW Recommendations) dargestellt (grau dargestellt), obwohl deren Anwendung nur für Beanspruchungen von $\sigma \leq 0,8 \cdot f_y$ empfohlen wird. Für Quersteifen aus S355 wird bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ die FAT-Klasse 140 und die Wöhlerlinienneigung zu $m = 5$ angesetzt. Festzustellen ist, dass diese Bemessungswöhlerlinie bezüglich der einzelnen Datenpunkte konservativ ist. Dies gilt jedoch nicht für die nach vorheriger Überlast ermittelte Wöhlerlinie HFH-behandelter Quersteifen.

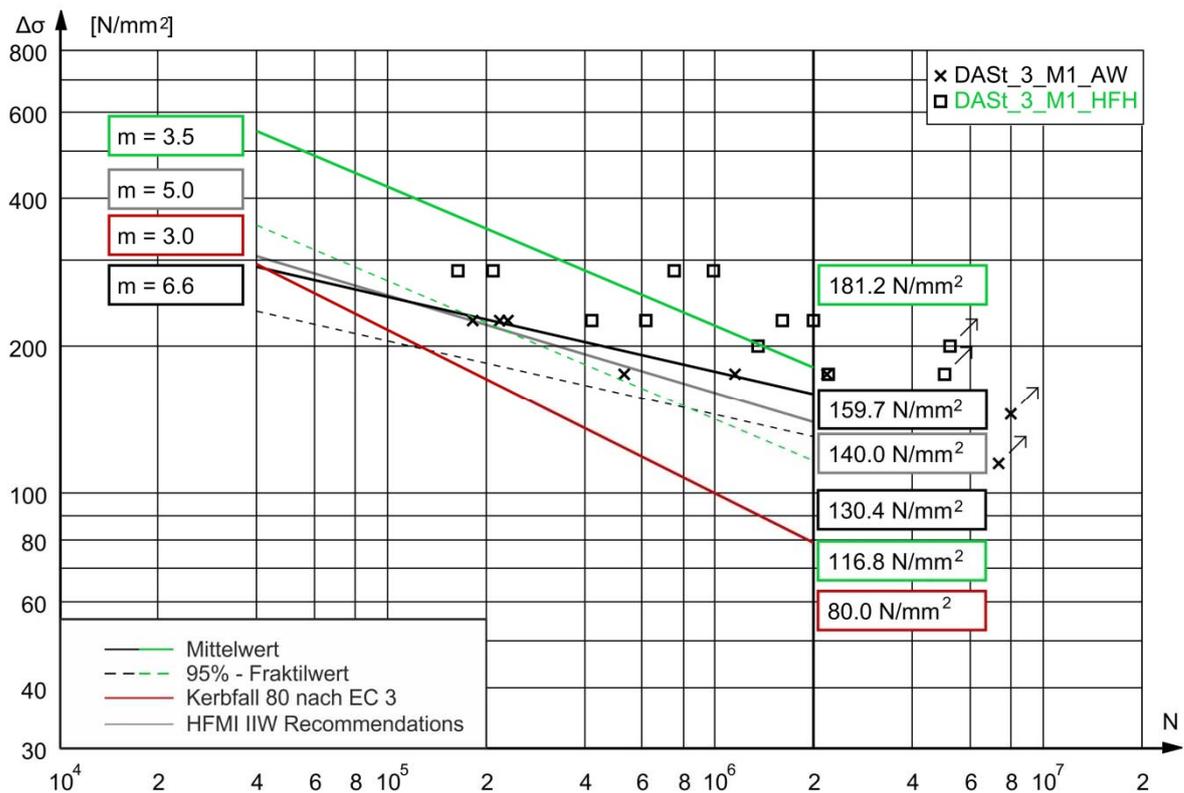


Abbildung 3-65: Nennspannungswöhlerlinien für die Quersteife, Lastfolge M1: Zustand aw (DAST_3_M1_AW) und HFH-behandelt (DAST_3_M1_HFH), R = 0,1

Figure 3-65: S-N curve for nominal stress of transverse attachment, load sequence M1: Aw condition (DAST_3_M1_AW) and HFMI-treated condition (DAST_3_M1_HFH), R = 0.1

Zur besseren Einordnung des Einflusses der vor Versuchsbeginn aufgetragenen Zugüberlasten sind in Abbildung 3-66 die Einzelergebnisse der HFH-behandelten Quersteifen mit Überlasten zusammen mit der Wöhlerlinie der HFH-behandelten Referenzprüfkörper aus Abbildung 3-17 dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Datenpunkte der HFH-behandelten Quersteifen mit Zugüberlasten (quadratische Symbole) bis auf zwei Datenpunkte im Bereich des Streubandes einstufig beanspruchter HFH-behandelter Quersteifen liegen.

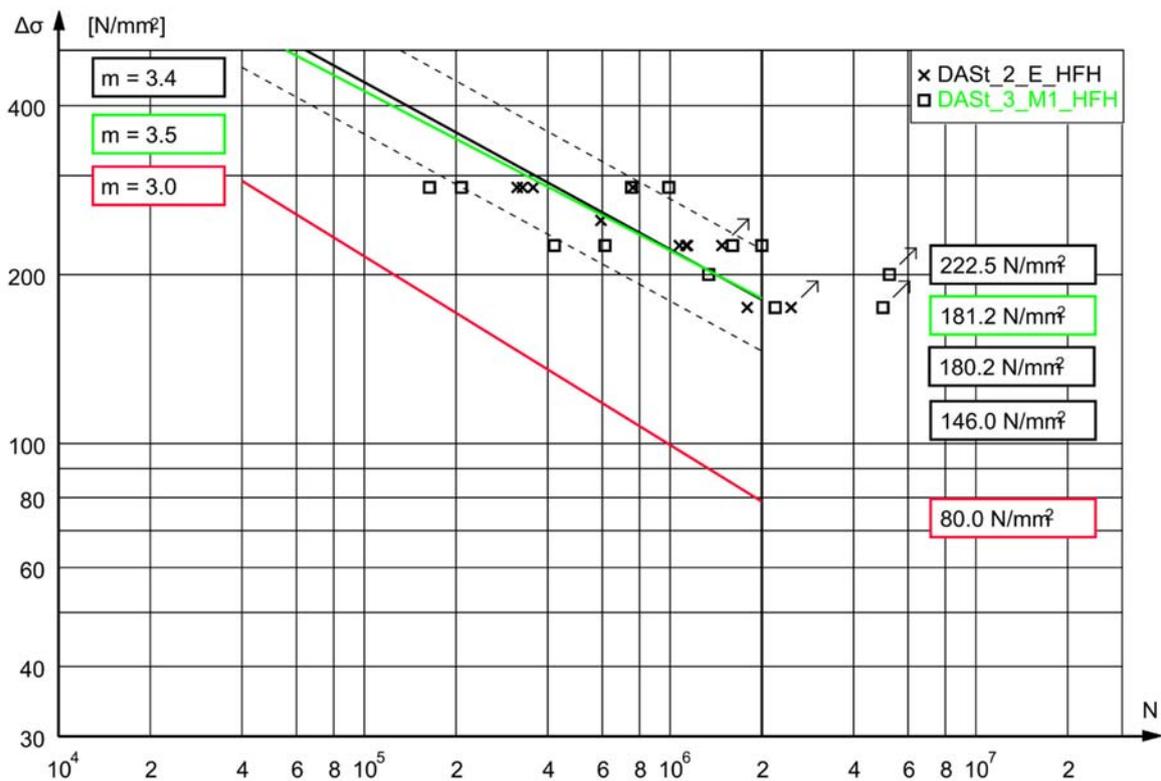


Abbildung 3-66: Nennspannungswöhlerlinie für die Quersteife: HFH-behandelte Referenzprüfkörper (DAST_2_E_HFH) und HFH-behandelte Quersteife mit Lastfolge M1 (DAST_3_M1_HFH), $R = 0,1$

Figure 3-66: S-N curve for nominal stress of transverse attachment: HFMI-treated specimens (reference) (DAST_2_E_HFH) and HFMI-treated specimens with load sequence M1 (DAST_3_M1_HFH), $R = 0.1$

3.6.1.2 Mehrstufige Belastung M2: Überlasten druckschwellend

An zwei Versuchsserien mit Quersteifen in den Zuständen „wie geschweißt“ (aw) und HFH-behandelt (HFH) wird der Einfluss von druckschwellenden Überlasten untersucht. Dazu wird vor Ermüdungsversuchsbeginn ein Belastungsblock von 100 Lastspielen mit einer Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma = -402 \text{ N/mm}^2$ gemäß Abbildung 3-67 eingestreut. Diese Überlasten entsprechen 90 % der oberen Streckgrenze R_{eH} des Grundwerkstoffs. Exemplarisch ist die Aufzeichnung des Kraft-Maschinenweg-Diagramms einer Quersteife beim Aufbringen der Überlasten in Abbildung 3-68 dargestellt.

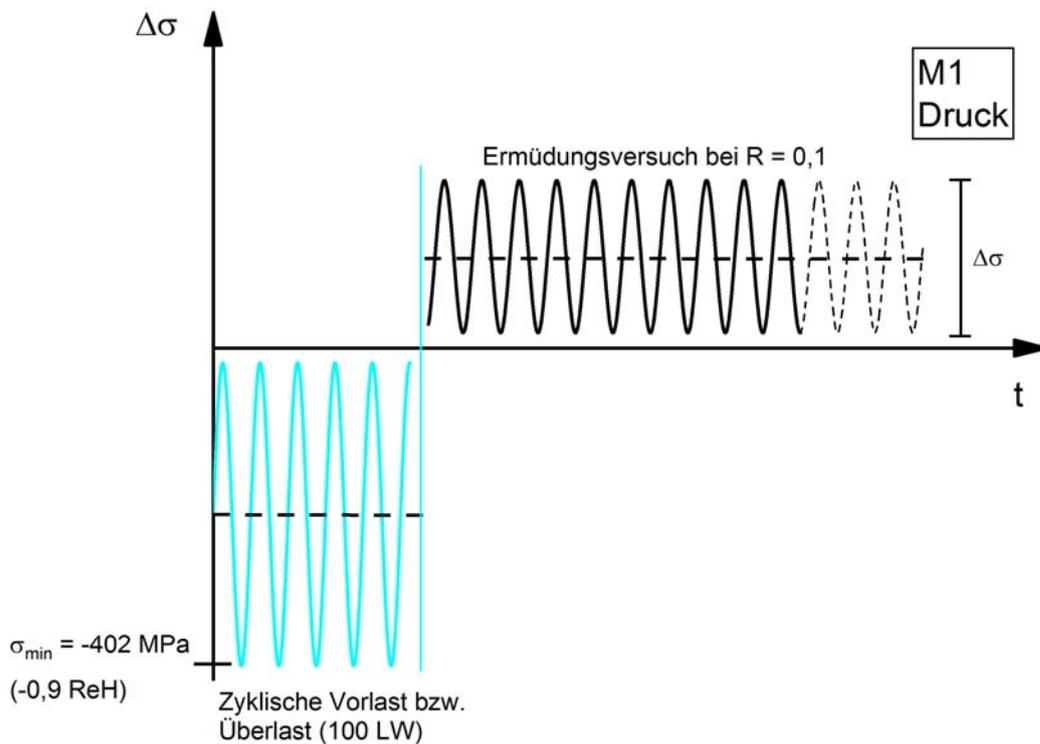


Abbildung 3-67: Lastfolge M2 – druckschwellige Überlasten vor Ermüdungsversuchsbeginn

Figure 3-67: Load sequence M2 – compressive overloads prior to fatigue testing

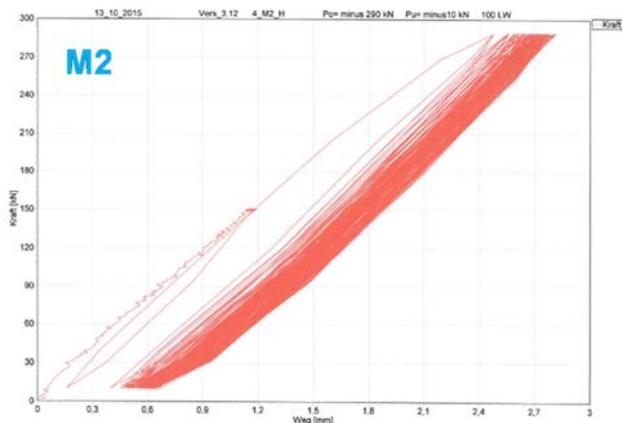


Abbildung 3-68: Lastfolge M2 – Kraft-Maschinenweg-Aufzeichnung

Figure 3-68: Load sequence M2 – force-displacement recording of testing rig

Nach Aufbringen der druckschwelligenden Überlasten werden die Prüfkörper aus der Universalprüfmaschine ausgebaut und auf der Resonanzprüfmaschine im Ermüdungsversuch bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ geprüft. Die Beanspruchungen sowie die erreichten Lastspielzahlen der einzelnen Ermüdungsversuche sind im Anhang C im Detail dargestellt.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse beider Serien aus Tabelle 4 erfolgt nennspannungsbasiert in Abbildung 3-69. Im Zustand a_w (schwarz strichliert dargestellt) beträgt die ermittelte Ermüdungsfestigkeit bei $N_c = 2 \cdot 10^6$ Lastspielen $\Delta\sigma_c = 63,1 \text{ N/mm}^2$. Diese ist um 36 % geringer

Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeitssteigerung durch Anwendung der Höherfrequenten Hämmerverfahren

als bei den zugschwellend geprüften Quersteifen ohne Überlasten und die Neigung weist einen Wert von $m = 2,7$ auf. Der nach EC 3 Teil 1-9 [16] anzusetzende Kerbfall 80 (rot dargestellt) liegt nicht auf der sicheren Seite. Die aufgetragenen druckschwellenden Überlasten führen zu einer deutlichen Reduktion der Ermüdungsfestigkeit.

Die HFH-behandelten Quersteifen erreichen eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 108,3 \text{ N/mm}^2$ (grün strichliert dargestellt) bei einer relativ großen Streuung. Die Wöhlerlinie weist mit einer Neigung von $m = 2,7$ die gleiche Neigung wie die der Quersteifen im Zustand aw auf. Die Ergebnisse der HiFIT- und PIT-behandelten Quersteifen werden gemeinsam ausgewertet. Zwei Proben werden nicht mit ausgewertet (mit Pfeil markiert), weil beim Aufbringen der Vorlasten trotz der verwendeten Vorrichtung erhebliche Verformungen auftreten. Im Vergleich mit dem Kerbfall 80 des EC 3 wird die Ermüdungsfestigkeit durch die HFH-Behandlung um 35 % gesteigert. Festzustellen ist, dass die Ergebnisse HFH-behandelter Quersteifen deutlich über den Ergebnissen im Zustand aw liegen. Insgesamt werden geringere Ermüdungsfestigkeiten als bei den Quersteifen, die durch Zugüberlasten vorbeanspruchung werden, erreicht.

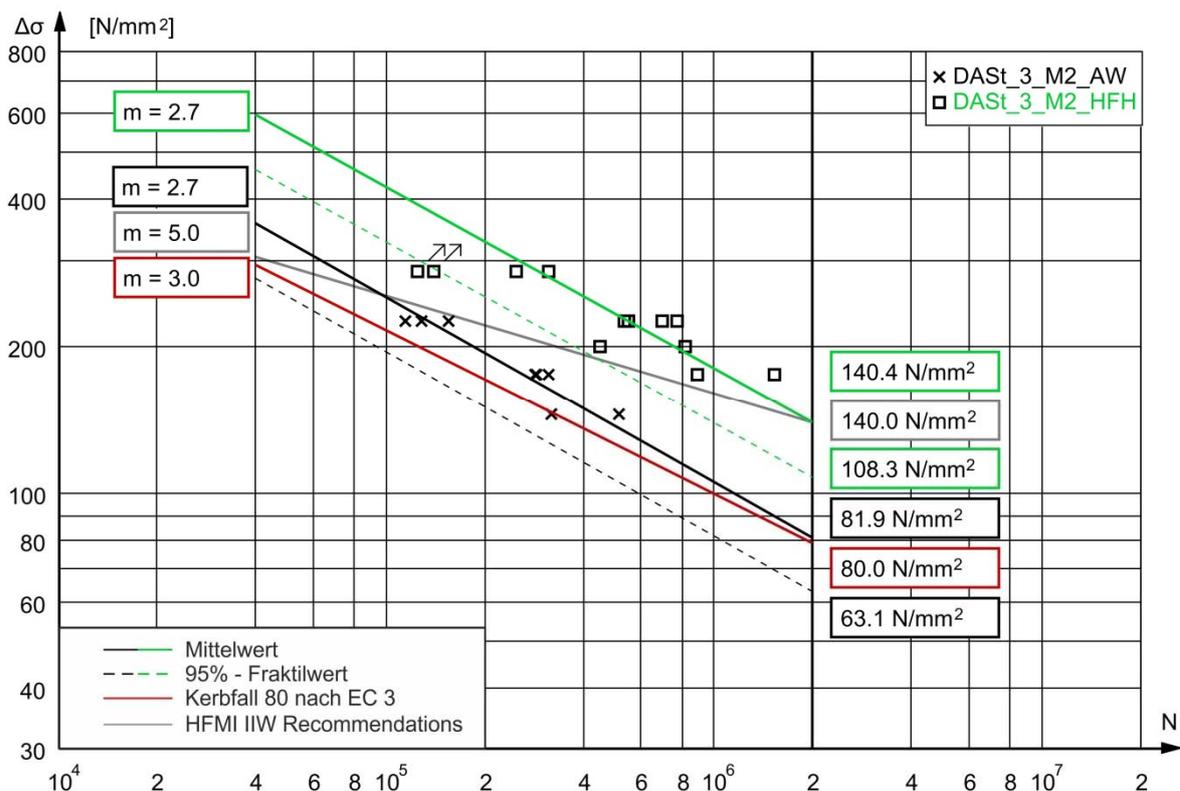


Abbildung 3-69: Nennspannungswöhlerlinien für die Quersteife, Lastfolge M2: Zustand aw (DAST_3_M2_AW) und HFH-behandelt (DAST_3_M2_HFH), $R = 0,1$

Figure 3-69: S-N curve for nominal stress of transverse attachment, load sequence M2: Aw condition (DAST_3_M2_AW) and HFMI-treated condition (DAST_3_M2_HFH), $R = 0.1$

Vergleichend ist die Bemessungswöhlerlinie der IIW Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißnähte [68] (HFMI IIW Recommendations) dargestellt (grau dargestellt), deren Anwendung für Beanspruchungen von $\sigma \leq 0,8 \cdot f_y$ empfohlen wird. Für Quersteifen aus S355 wird bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ die FAT-Klasse 140 und die Wöhlerlinienneigung zu $m = 5$ angesetzt. Festzustellen ist, dass diese Bemessungswöhlerlinie bezüglich der einzelnen

Datenpunkte konservativ ist. Dies gilt jedoch nicht für die nach vorheriger Überlast ermittelte Wöhlerlinie HFH-behandelter Quersteifen.

Um den Einfluss der vor Versuchsbeginn aufgetragenen Drucküberlasten besser einordnen zu können, sind in Abbildung 3-70 die Einzelergebnisse der HFH-behandelten Quersteifen mit Überlasten zusammen mit der Wöhlerlinie der HFH-behandelten Referenzprüfkörper aus Abbildung 3-17 dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Datenpunkte der HFH-behandelten Quersteifen mit Drucküberlasten (quadratische Symbole) bis auf zwei Datenpunkte im Bereich des Streubandes einstufig beanspruchter HFH-behandelter Quersteifen liegen.

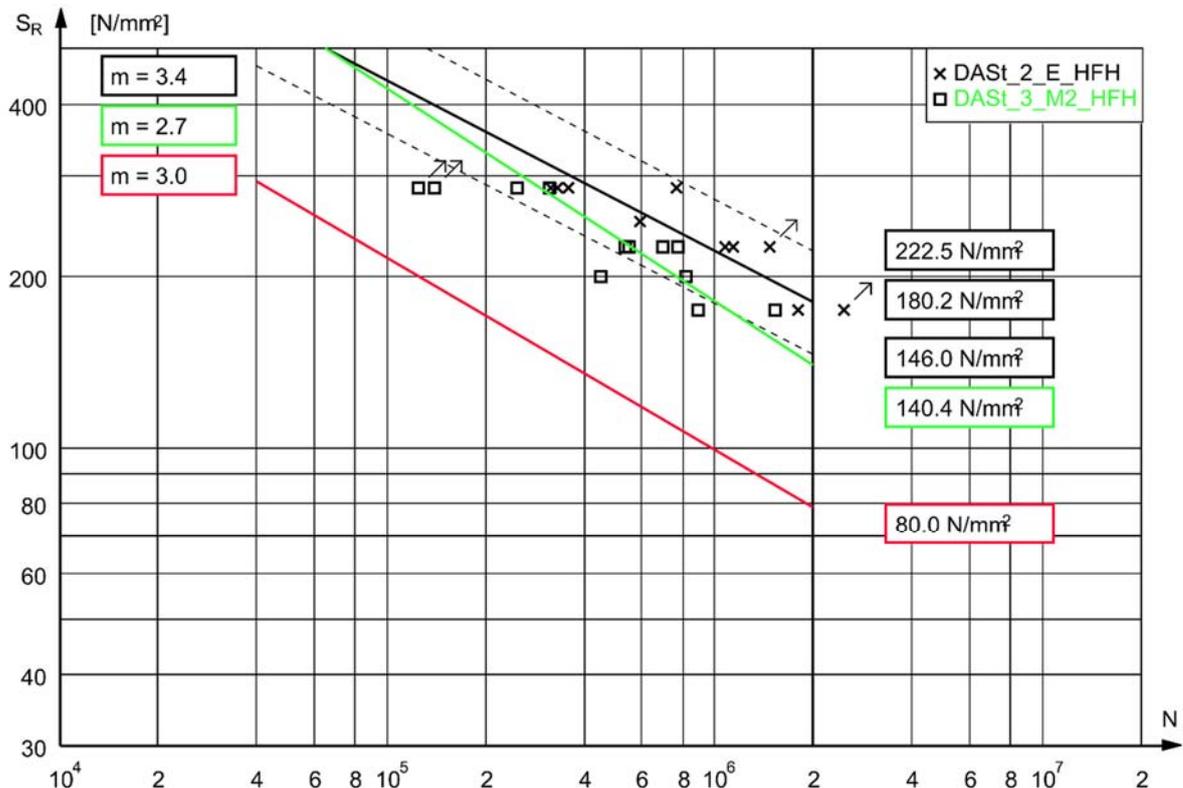


Abbildung 3-70: Nennspannungswöhlerlinie für die Quersteife: HFH-behandelte Referenzprüfkörper (DAST_2_E_HFH) und HFH-behandelte Quersteife mit Lastfolge M2 (DAST_3_M2_HFH), $R = 0,1$

Figure 3-70: S-N curve for nominal stress of transverse attachment: HFMI-treated specimens (reference) (DAST_2_E_HFH) and HFMI-treated specimens with load sequence M2 (DAST_3_M2_HFH), $R = 0.1$

3.7 Nachbehandlung bei Vorbelastung

3.7 Post-treatment with preload

3.7.1 Ermüdungsversuche an Kleinprüfkörpern zum Einfluss durch Vorbelastung

3.7.1 Small scale fatigue tests for preload effects

Anhand der Versuche zum Einfluss der Vorbelastung gemäß Tabelle 4 wird die Möglichkeit der Lebensdauererlängerung von bereits bis zur rechnerischen Lebensdauer vorbeanspruchten Konstruktionen untersucht. Die Probekörper werden im Zustand a_w bis zur rechnerischen Lebensdauer im Ermüdungsversuch bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$

vorbeansprucht. Es werden drei Spannungsschwingbreitenniveaus gewählt und für diese die rechnerische Bruchlastspielzahl N_f für die Vorbeanspruchung bestimmt. Die rechnerischen Bruchlastspielzahlen N_f werden anhand der aus den Referenzprüfkörpern in Abbildung 3-17 im Zustand aw ermittelten Wöhlerlinie bestimmt und repräsentieren den 95%-Fraktilwert. Die rechnerischen Bruchlastspielzahlen N_f sind in Tabelle 12 zusammengestellt und die Vorgehensweise wird anhand von Abbildung 3-71 veranschaulicht. Nach der Ermüdungsvorbelastung werden die Prüfkörper bei Erreichen von N_f aus der Prüfmaschine ausgebaut, mit dem jeweiligen HFH-Verfahren behandelt und bis zum Versagen im Ermüdungsversuch weitergeprüft. Durch die hohe gewählte Ermüdungsvorbelastung kommt es bei zwei Prüfkörpern bereits während der Vorbelastung zum Versagen. Diese Prüfkörper werden im Rahmen der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

Tabelle 12: Rechnerische Bruchlastspielzahlen für Quersteifen im Zustand aw abhängig von der Spannungsschwingbreite

Table 12: Calculated load cycles to failure for specimens in aw condition depending on nominal stress range

Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Rechnerische Bruchlastspielzahl N_f
145	624.300
175	348.511
225	189.907

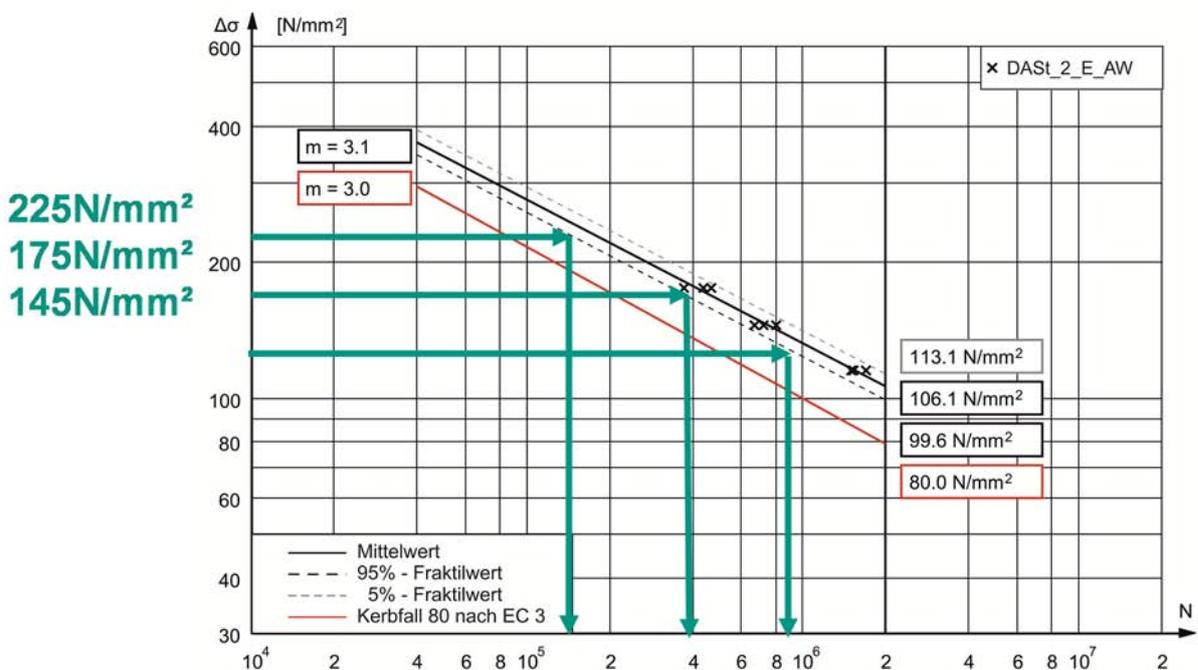


Abbildung 3-71: Nennspannungswöhlerlinie für die Quersteife im Zustand aw: Vorgehensweise zur Bestimmung der Ermüdungsvorbelastung

Figure 3-71: S-N curve for nominal stress of transverse attachment in aw condition: Approach for determination of fatigue preload

Für die ermüdungsvorbeanspruchten Prüfkörper sind in Abbildung 3-72 lediglich die erreichten Schwingspielzahlen nach erfolgter HFH-Behandlung aufgetragen. Die Lastspielzahlen aus der Vorbelastung werden vernachlässigt. Die Darstellung erfolgt entsprechend der eines „Neubauteils“. Die Beanspruchungen sowie die erreichten Lastspielzahlen der einzelnen Ermüdungsversuche sind im Anhang C im Detail dargestellt.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt nennspannungsbasiert in Abbildung 3-69. Als Referenz ist die Wöhlerlinie der Quersteifen im Zustand aw (schwarz strichliert dargestellt) sowie die nach EC 3 Teil 1-9 [16] anzusetzende Bemessungswöhlerlinie (rot dargestellt).

Die Ergebnisse der HiFIT- und PIT-behandelten Quersteifen werden gemeinsam ausgewertet. Nach erfolgter Vorbelastung erreichen die HFH-behandelten Quersteifen eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 86,4 \text{ N/mm}^2$ (grün strichliert dargestellt) bei einer großen Streuung. Die Wöhlerlinie weist mit einer Neigung von $m = 5,8$ eine sehr flache Neigung auf. Die große Streuung ist der Tatsache geschuldet, dass lediglich sechs Versuche in der Auswertung berücksichtigt sind. Der Grund dafür ist, dass Anrisse aus der Vorbelastung bei drei Proben übersehen worden sind, die in der Auswertung nicht berücksichtigt werden (markiert mit Pfeil im Zeitfestigkeitsbereich).

Die Ergebnisse der Versuche liegen über der zum Kerbfall 80 gehörenden Wöhlerlinie des EC 3 Teil 1-9 [16]. Daraus lässt sich schließen, dass die Lebensdauer bei den durchgeführten Versuchen nach der Vorbelastung durch die HFH-Behandlung wieder auf den Ursprungswert eines unbehandelten Kerbdetails zurückgesetzt werden und somit in den Zustand eines Neubauteils versetzt werden kann.

Zum Vergleich ist die Bemessungswöhlerlinie der IIW Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißnähte [68] (HFMI IIW Recommendations) dargestellt (grau dargestellt). Für Quersteifen aus S355 wird bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ die FAT-Klasse 140 und die Wöhlerlinienneigung zu $m = 5$ angesetzt. Festzustellen ist, dass diese Bemessungswöhlerlinie weder bezüglich der einzelnen Datenpunkte, noch bezüglich der ermittelten Wöhlerlinie konservativ ist.

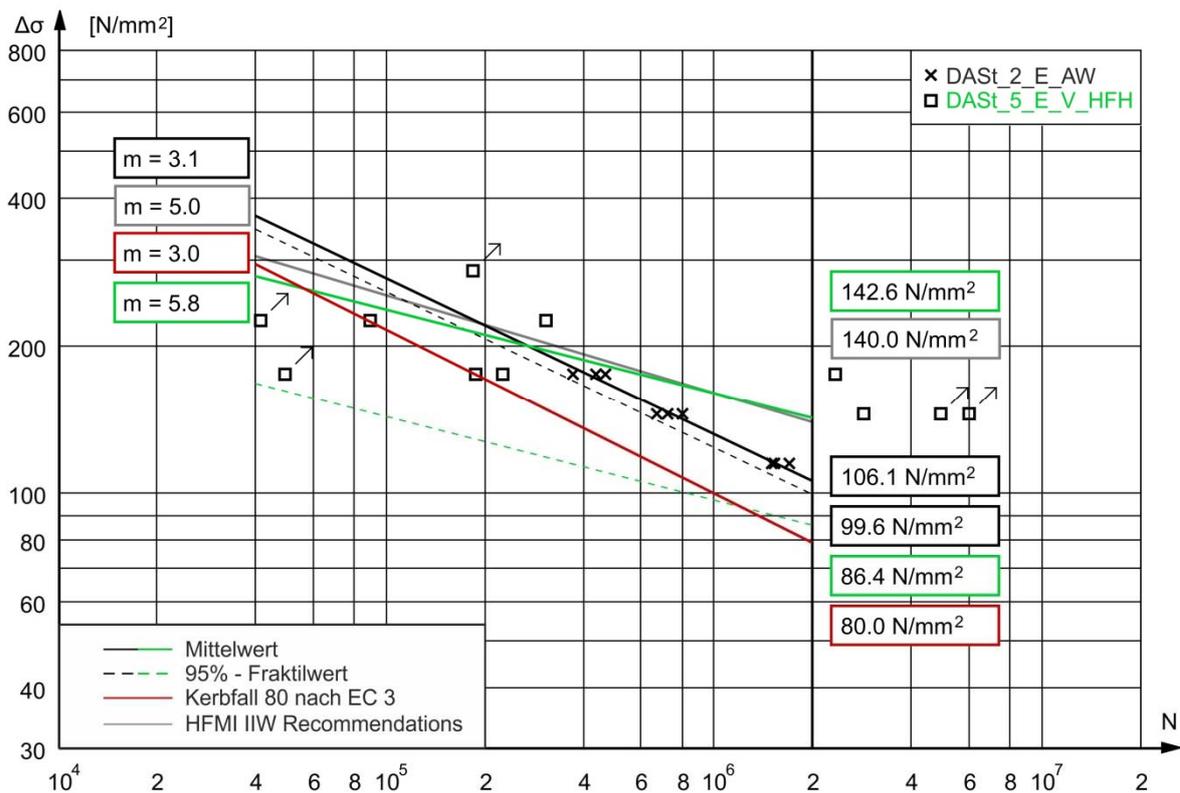


Abbildung 3-72: Nennspannungswöhlerlinie für die Quersteife: Referenzprüfkörper im Zustand aw (DAST_2_E_AW) und HFH-behandelte Quersteife nach Vorbelastung (DAST_5_E_V_HFH), $R = 0,1$

Figure 3-72: S-N curve for nominal stress of transverse attachment: Reference specimen in aw condition (DAST_2_E_AW) and HFMI-treated specimens after fatigue preload (DAST_5_E_V_HFH), $R = 0.1$

3.8 Einfluss variierender Behandlungsintensität

3.8 Influence of varying intensity of HFMI-treatment

3.8.1 Ermüdungsversuche an Kleinprüfkörpern zum Einfluss variierender Intensität

3.8.1 Small scale fatigue tests on the influence under varying intensity

Dieser Abschnitt stellt die Ermüdungsversuche an Quersteifen unter Variation der Intensität vor und baut maßgeblich auf dem Abschlussbericht des FOSTA Projekts [91] zur Qualitätssicherung höherfrequenter Hämmerverfahren auf. Ziel ist es, den Einfluss von HFH-Behandlungsintensitäten zu untersuchen, die von den optimalen und von den Herstellern empfohlenen Werten abweichen. Ziel ist es, Erkenntnisse zur Sensitivität der Verfahren zu erhalten. Dazu werden je Verfahren zwei Prüfkörper mit zu hoher und zwei Prüfkörper mit zu geringer Intensität behandelt und anschließend im Ermüdungsversuch bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ geprüft.

Beim PIT-Verfahren wird die Intensität über die Behandlungsgeschwindigkeit variiert. Der Richtwert einer angemessenen Behandlung liegt bei 20 cm/min, ist jedoch abhängig von der

tatsächlichen Kerbgeometrie. Der PIT-Anwender nimmt dementsprechend eine Nachbehandlung normaler Intensität vor und halbiert die Nachbehandlungsdauer für eine Behandlung mit geringer Intensität. Für eine Behandlung mit hoher Intensität wird die Behandlungszeit dementsprechend verdoppelt. So wird der 60 mm lange Schweißnahtübergang in Abhängigkeit der Variation der Intensität folgendermaßen nachbehandelt:

- Nachbehandlung mit normaler Intensität: 30 sec
- Nachbehandlung mit geringer Intensität: 15 sec
- Nachbehandlung mit hoher Intensität: 60 sec

Nach der HFH-Behandlung mit geringer Intensität sind visuell noch Restkerben zu erkennen.

Die Nachbehandlungsintensität des HiFIT-Geräts wird über einen Verstellmechanismus reguliert. Die Schweißnahtübergänge werden unter Variation der Intensität wie folgt nachbehandelt:

- Nachbehandlung mit normaler Intensität: Einstellung 200°
- Nachbehandlung mit geringer Intensität: Einstellung 0°
- Nachbehandlung mit hoher Intensität: Einstellung 270°

Unterschieden wird auch im Rahmen dieser Versuchsserie zwischen einer optimalen bzw. normalen Behandlungsintensität sowie einer hohen (Serie I_hoch) und einer niedrigen (Serie I_niedrig) Intensität. Die Beanspruchungen sowie die erreichten Lastspielzahlen der einzelnen Ermüdungsversuche sind im Anhang C im Detail dargestellt. Die Ergebnisse der HiFIT- und PIT-behandelten Quersteifen werden gemeinsam ausgewertet.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt nennspannungsbasiert in Abbildung 3-73. Die einzelnen Ergebnisse sind zusammen mit der Wöhlerlinie an mit optimaler Intensität behandelten Prüfkörpern aus Abbildung 3-17 (Serie: DAST_2_E_HFH) dargestellt. Sowohl die mit hoher als auch die mit niedriger Intensität behandelten Prüfkörper liegen im Streuband der mit optimaler Intensität behandelten Prüfkörper, wobei für diese Prüfkörper eine größere Streuung festzustellen ist. Des Weiteren zeigt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Behandlungsintensität und der erreichten Lebensdauer bei diesen Prüfkörpern. Beispielsweise wird auf einem Beanspruchungsniveau von 225 N/mm² und der niedrigen Behandlungsintensität sowohl die geringste als auch die höchste Lastspielzahl erreicht. Die grüne Wöhlerlinie fasst dabei die mit hoher Intensität erreichte Ermüdungsfestigkeit bei 50% Überlebenswahrscheinlichkeit (Mittelwert) zusammen, die blaue Wöhlerlinie den Mittelwert der mit geringer Intensität nachbehandelten Prüfkörper. Der Unterschied zur Wöhlerlinie der Referenzprüfkörper (schwarz dargestellt), die mit normaler Intensität behandelt sind, fällt sehr gering aus.

Diese Tastversuche zur Ermüdungsfestigkeit von mit variierender Intensität nachbehandelten Schweißnahtübergängen deuten darauf hin, dass die Sensitivität der Ermüdungsfestigkeit im Hinblick auf die Intensität beider Nachbehandlungsverfahren relativ gering ist. Abbildung 3-73 zeigt, dass trotz starker simulierter Abweichungen in der Behandlungsintensität noch Ermüdungsfestigkeitswerte erreicht werden können, die im Streuband normal bzw. optimal behandelte Prüfkörper liegen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass anhand der Ermüdungsversuche an Prüfkörpern mit unterschiedlicher Nachbehandlungsintensität gezeigt werden kann, dass eine variierende Nachbehandlungsqualität einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Dieser liegt jedoch im Streubereich der mit normaler bzw. optimaler Intensität behandelte Prüfkörper.

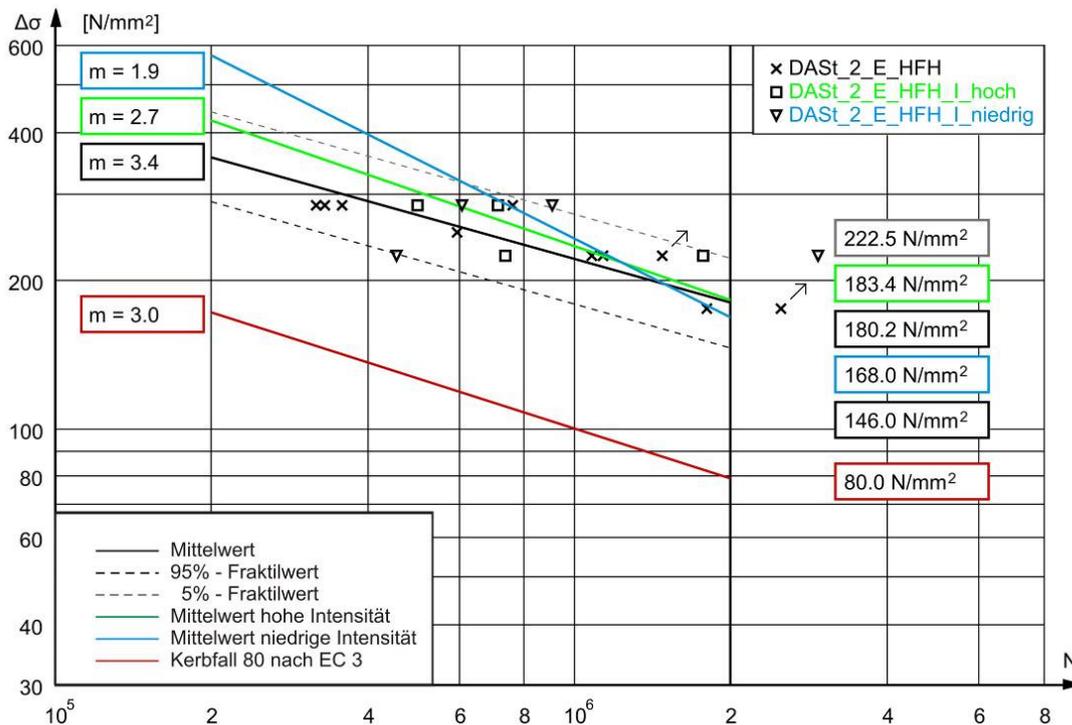


Abbildung 3-73: Nennspannungswöhlerlinie für die Quersteife der Referenzprüfkörper im Zustand HFH-behandelt (DAST_2_E_HFH) und Ergebnisse HFH-behandelter Quersteifen mit variiertter Behandlungsintensität (DAST_2_E_HFH_I_hoch-niedrig), R = 0,1

Figure 3-73: S-N curve for nominal stress of transverse attachment of reference specimens in HFMI-treated condition (DAST_2_E_HFH) and results of HFMI-treated specimens with varied treatment intensity (DAST_2_E_HFH_I_hoch-niedrig), R = 0.1

3.9 Einfluss der Streckgrenze

3.9 Influence of yield strength

3.9.1 Allgemeines

3.9.1 General

Die Vorteile und somit die Anwendung höherfester Stahlgüten in wechselbeanspruchten Konstruktionen sind durch die fehlende Unterscheidung verschiedener Werkstoffgüten bei der Ermüdungsbemessung nach DIN EN 1993-1-9 [16] begrenzt. Da jedoch in vielen Fällen ermüdungsbeanspruchter Konstruktionen, beispielsweise bei Stahl- und Verbundbrücken der Nachweis der Materialermüdung maßgebend sind, lohnt sich der höhere Materialpreis für hochfeste Stähle oft nur unter der Voraussetzung, dass der Ansatz der besseren Materialeigenschaften auch für den Ermüdungsnachweis berücksichtigt werden darf.

Bei geschweißten Konstruktionen ergeben sich durch die dominierende Kerbwirkung gegenüber den Materialfestigkeiten kaum Unterschiede in der Ermüdungsfestigkeit normalfester zu höherfesten Baustählen. Jedoch lässt sich bei milden Kerben bzw. ungekerbten Bauteilen ein zunehmender Einfluss erkennen.

Unter Anwendung der HFH-Verfahren verbessert sich die Ermüdungsfestigkeit mit steigender Streckgrenze des behandelten Werkstücks signifikant, so dass es die HFH-Nachbehandlung

ermöglicht das im gekerbten Zustand werkstoffunabhängige Ermüdungsverhalten werkstoffabhängig zu machen, siehe 3.9.3.

Die in diesem Projekt durchgeführten Versuche wurden am S355 unternommen. Aufgrund der ausführlichen Datenbasis hinsichtlich des Streckgrenzeinflusses hat man sich in diesem Projekt darüber verständigt, die Versuchsserien auf die Stahlgüte S355 zu begrenzen und Einflussgrößen zu bestimmen, deren Datengrundlage weniger stark belegt ist.

3.9.2 Im Schweißzustand

3.9.2 As-welded condition

Die Größe der Ermüdungsfestigkeit eines geschweißten bzw. gekerbten Konstruktionsdetails, hängt im hohen Maß von der Kerbschärfe des vorliegenden Details ab. So ergibt sich für kerbscharfe Details, beispielsweise die unbelastete Längssteife eine geringere Ermüdungsfestigkeit gegenüber dem querbelasteten Stumpfstoß, der vor allem durch einen geringeren Nahtanstiegswinkel an Kerbschärfe verliert.

Prinzipiell gilt im unbehandelten Zustand deshalb, mit steigender Kerbschärfe eines geschweißten Details nimmt der Einfluss der verwendeten Stahlgüte auf die Ermüdungsfestigkeit ab. Jedoch ist dieser Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit für geschweißte Bauteile relativ gering.

3.9.3 Im HFH-Zustand

3.9.3 HFH-condition

Zwar unterscheidet sich die Ermüdungsfestigkeit von gekerbten Schweißkonstruktionen bei zunehmender Streckgrenze kaum von Bauteilen mit geringerer Streckgrenze f_y . Dieser Effekt gilt jedoch nicht für HFH-nachbehandelte geschweißte Konstruktionen.

Da durch die Anwendung der HFH-Verfahren Druckeigenspannungen in Abhängigkeit der Höhe der Streckgrenze am Schweißnahtübergang eingebracht werden, können bei Bauteilen mit größeren Streckgrenzen, noch höhere Druckeigenspannungen eingebracht werden, so dass bei Bauteilen mit höherer Streckgrenze ein größerer Puffer gegenüber der effektiven Beanspruchung, die sich aus Eigenspannungen und äußeren Beanspruchungen zusammensetzt, herrscht. Infolgedessen ergibt sich eine Werkstoffabhängigkeit für HFH-nachbehandelte Kerbdetails, deren Ansatz für den Entwurf einer DAST-Richtlinie berücksichtigt werden sollte.

Der Einfluss der bisher wohl am ausführlichsten in Hinblick auf die ermüdungsfestigkeitssteigernde Wirkung der HFH-Verfahren untersucht wurde, ist die Verbesserung in Abhängigkeit der Streckgrenze. So befassten sich bereits vorhergehende Forschungsprojekte Kuhlmann et al. [59] bzw. Dürr [30] mit der Nachbehandlung von S335 über S460 bis S690 an der Quersteife und Ummenhofer et al. [90] bzw. Weich [99] mit nachbehandelten Längsrippen und Stumpfstoße aus S355J2 und S690QL. Des Weiteren wurden experimentelle Untersuchungen durch Kuhlmann et al. [56] am S355J2 und S690QL für den Stumpfstoß und die Quersteife an durch PIT-nachbehandelten Proben durchgeführt. Außerdem liegen Erkenntnisse an der nachbehandelten Quersteife aus normalfesten Baustahl S235 aus Kuhlmann et al. [61] vor. Neuere Erkenntnisse zur Anwendung der HFH-Verfahren an ultrahochfesten Feinkornbaustählen im Bereich von S960 bis S1300 liefern Stranghöner und Berg in [87] bzw. [2].

Abbildung 3-74 zeigt den Einfluss einer HiFIT und UIT-Nachbehandlung bei steigender Streckgrenze aus Weich [99]. Dabei ergibt sich ein gegenüber der Versuchsserie mit S355J2 durchgeführten Probestücken um 13,6 % gesteigerter Bezugswert der Spannungsschwingbreite. Durch das häufigere Auftreten von Grundmaterialversagen bei HFH-nachbehandelten hochfesten Probekörpern, ergeben sich in Hinblick auf die Beurteilung des theoretisch angestrebten Nahtübergangsversagens i. d. R. Mindestwerte der Ermüdungsfestigkeit für hochfeste Kerbdetails.

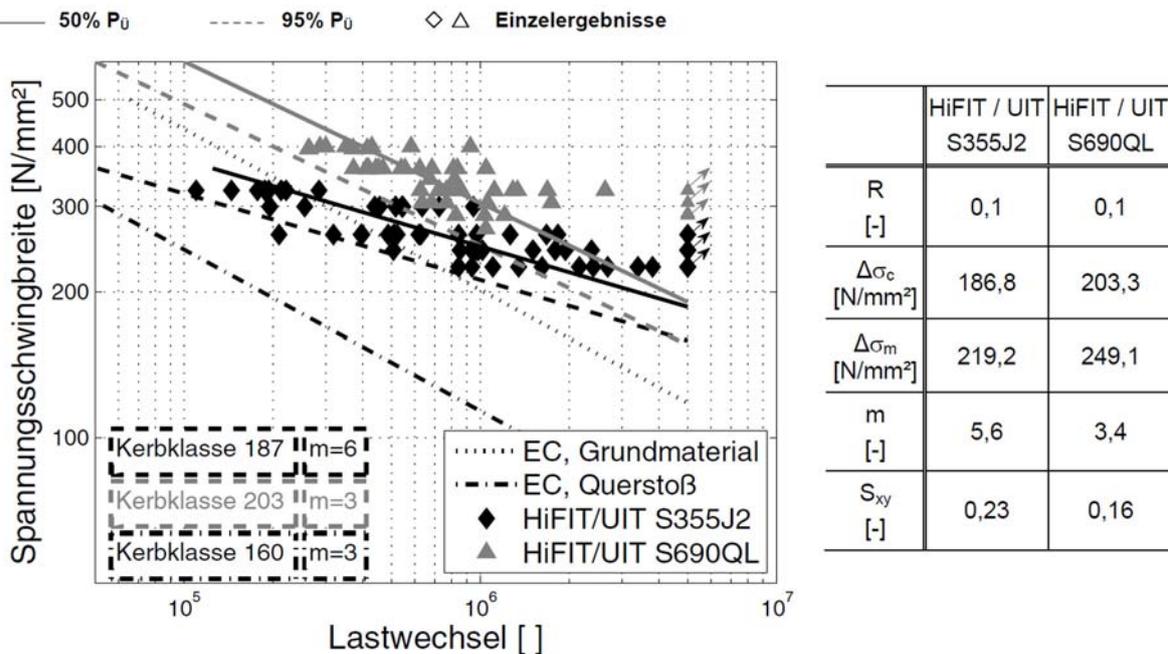


Abbildung 3-74: Einfluss unterschiedlicher Streckgrenzen am querbelasteten Stumpfstoß aus [99]

Figure 3-74: Influence of differing yield strength for transverse loaded butt weld from [99]

4 Versuchsdatenbank

4 Data base of tests

Kurzfassung

Mit dem Ziel eine Vielzahl an Versuchsdaten hinsichtlich verschiedener beeinflussender Kriterien filtern und bewerten zu können wurden alle, den beiden Forschungsstellen vorliegenden relevanten Versuchsdaten in eine Datenbank integriert. Dieses Kapitel fasst umfassende Informationen zu dieser im Rahmen des Projekts erstellten Versuchsdatenbank zusammen. Die Anforderungen an die Datenbank werden im Vorfeld beschrieben, sowie die Entwicklung als auch die Struktur der Datenbank vermittelt. Alle in der Datenbank enthaltenen Kriterien sowie deren entsprechende Parameter werden erläutert. Darüber hinaus werden Übersichten zur Verteilung der eingepflegten Datensätze über die jeweiligen Kriterien gegeben.

Abstract

All available relevant test data of both research partners were integrated with regard to the aim to filter the test data concerning influencing criteria and evaluate them. This chapter summarizes extensive information about the test data base that has been created in the frame of the project. The requirements on the data base is described beforehand and the development and also the structure of the data base is conveyed. All of the in the data base contained criteria as well as the parameter are explained. Furthermore overviews for the distribution of the populated records of the respective criteria is given.

4.1 Allgemeines

4.1 General

Zur Beurteilung der bisher entwickelten Bemessungskonzepte [30], [59], [99], [90], [68] soll der Vergleich zwischen den vorgeschlagenen Empfehlungen mit den bisher existierenden HFH-nachbehandelten Versuchsergebnissen hergestellt werden. Etwaige Lücken in der Datenbasis sollen aufgedeckt und beispielsweise unbegründete und nicht belegbare Abschätzungen identifiziert werden.

Mit diesem Ziel wurden zunächst alle den Autoren bekannten und zugänglichen, bisher in Deutschland im Rahmen von nationalen und internationalen Forschungsprojekten durchgeführten Versuche gesammelt und auf deren Relevanz geprüft.

Diese einzelnen relevanten Versuchsdaten wurden in einer mit Microsoft Access erstellten HFH-Versuchsdatenbank über Eingabeformulare mit diversen Kriterien eingepflegt, so dass eine Abfrage und Filterung über entsprechende Kriterien möglich ist.

4.1.1 Anforderungen an die Datenbank

4.1.1 Requirements concerning the data base

Primärschlüssel, Keine Abmessungen

4.1.2 Datensammlung

4.1.2 Collection of data

Die Datensammlung beschränkt sich vorwiegend auf Versuchsserien aus dem deutschsprachigen Raum, deren Parameter, beispielsweise Stahlgüten für den deutschen und europäischen ermüdungsbeanspruchten Anwendungsbereich relevant sind. Auch die Nachvollziehbarkeit von Versuchskörpergeometrie, Schweißverfahren und Werkstoffwahl wurde hierbei berücksichtigt, so dass nur Versuchsreihen aufgenommen wurden deren diverse Kriterien bekannt sind.

Tabelle 13 zeigt die Übersicht über die in der Datenbank berücksichtigten Forschungsprojekte, sowie die jeweils getesteten Parameter der übergeordneten Versuchsserien.

Tabelle 13: Übersicht der enthaltenen Forschungsprojekte und deren Versuchsdaten

Table 13: Overview of containing research projects and the test data

Kurzbezeichnung Forschungsprojekt	offizielle Nr.	Versuchsdurch- führende FSt.	Stahl- güte	Kerbdetail	Nachbe- hand- lungsver- fahren	Anzahl Ver- suchsda- ten N [-]
Anwendung HFH im Wasserbau [61]	Indust- rieprojekt	KIT, Stahl- und Leichtbau	S235	unbelastete Quersteife	HiFIT, PIT	70
		KE, Uni Stuttgart				

Experimentelle Untersuchungen zum PIT-Verfahren [56]	Industrie- rieprojekt	KE, Uni Stuttgart	S355	querbelasteter Stumpfstoß	PIT	52
			S690			
			S355	unbelastete Quersteife		
			S690			
hochfeste Stähle bei Offshore Windenergieanlagen [80]	IGF-Nr.: vvv / P633	KIT, Stahl- und Leichtbau	S460	querbelasteter Stumpfstoß	UIT	68
				unbelastete Quersteife		
Refresh [90]	Nr. 02PB2103 (BMBF) / P702	KIT, Stahl- und Leichtbau	S355	unbelastete Längssteife	UIT, HiFIT	665
			S690			
			S355	querbelasteter Stumpfstoß		
			S690			
Höherfeste Stähle unter Ermüdungsbeanspruchung [59]	IGF-Nr.: 13866 / P620	KE, Uni Stuttgart,	S355	unbelastete Quersteife	UIT	165
			S460			
			S690			
Enhancement of thin-walled high-strength steel joints [67]	-	Mechanical Engineering, Dep. Product Engineering, Montanuniversität Leoben (AT)	S355	unbelastete Quersteife	PIT	104
			S690			
			S355	querbelasteter Stumpfstoß		
			S690			
			S355	unbelastete Längssteife		
			S690			
SBRI – Sustainable Bridges [66]	RFCS	KE, Uni Stuttgart	S355	unbelastete Quersteife	PIT	4
Marquis [69]	-		S700	unbelastete Längssteife	UIT	23
Schwingend beanspruchte Tragwerke von Lastaufnahmemitteln [72]	Industrie- rieprojekt	DYNATEC GmbH	S700	querbelasteter Stumpfstoß	HiFIT	23
DASt-Rili HFH	IGF-Nr.: 17886	KIT, Stahl- und Leichtbau KE, Uni Stuttgart	S355	Unbelastete Quersteife	HiFIT, PIT	118
Okawa [77]			S355	Unbelastete Quersteife		4

4.1.3 Ermüdungsversuche im Zusammenhang mit HFH-Verfahren, die nicht in die Datenbank aufgenommen wurden

4.1.3 *Fatigue tests, that were not taken into account for the data bank*

Sowohl in [31] als auch in [64] konnte gezeigt werden, dass selbst bei Blechdicken mit $t = 100$ mm die Effektivität der HFH-Nachbehandlung gegeben ist, jedoch stehen in diesem Blechdickenbereich bisher zu wenige Versuchsergebnisse zur Verfügung, um eine abgesicherte Empfehlung geben zu können.

Aktuelle experimentelle Untersuchungen zum Maßstabeffekt im Stahlbau u.a. an HFH-behandelten unbelasteten Quersteifen und Längssteifen mit biegebeanspruchten Basisblechen wurden von Bucak et al. [5] durchgeführt. Die experimentell ermittelten Ergebnisse aus [5] sind für die hier betrachteten Konstruktionsdetails jedoch von untergeordnetem Interesse. Sowohl die in diesem Projekt untersuchten Kleinversuchskörper an der unbelasteten Quersteife, sowie diejenigen der unbelasteten Längssteife wurden an biegebeanspruchten Basisblechen durchgeführt, siehe Abbildung 4-1.

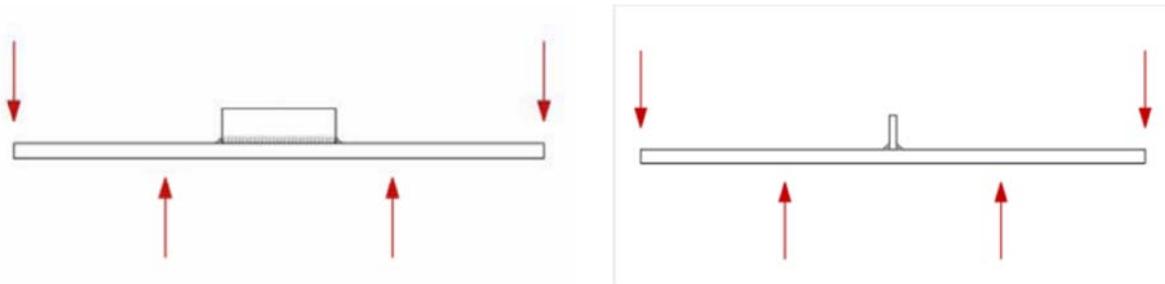


Abbildung 4-1: Biegebeanspruchte Prüfkörper aus [5]

Figure 4-1: Test specimen under bending load [5]

Unter Biegebeanspruchung ergibt sich im Allgemeinen eine günstigere Spannungsgradienten, als für normalspannungsbeanspruchte Querschnitte, siehe auch [81]. So verringert sich bei Biegebeanspruchung mit zunehmender Risstiefe die Spannung, so dass vor allem der Bereich des Rissfortschritts, der die Lebensdauer des Bauteils maßgeblich beeinflusst, ausgedehnter ist, als bei reiner Normalbeanspruchung des Blechs. In die Datenbank wurden deshalb ausschließlich normalbeanspruchte Kleinversuchskörperdaten aufgenommen. Eine ausführlichere Analyse ist hinsichtlich der unterschiedlichen Wirkung der Beanspruchungsart findet sich in [3]. Erstaunlicherweise konnte dieser begünstigende Effekt einer Biegebeanspruchung für das HFH-behandelte Detail der unbelasteten Längssteife in [5] nicht bestätigt werden. Es ergab sich gegenüber der im Schweißzustand belassenen Probekörperserie keine gesteigerte Ermüdungsfestigkeit durch die Anwendung des HFH-Verfahrens. Hingegen konnte in [5] für das Detail der unbelasteten Quersteife, deren Basisblech auf Biegung beansprucht wurde, eine Ermüdungsfestigkeitssteigerung durch die HFH-Behandlung bestätigt werden.

4.1.4 Aufbau der Datenbank

4.1.4 *Structure of the data base*

Die Datenbank enthält insgesamt zehn Tabellen, neun der zehn Tabellen geben die Kriterien und deren Parameter vor, die zehnte Tabelle ist die Versuchsdaten-Tabelle, die alle Daten mit

allen Kriterien enthält. Eine Übersicht über die Kriterien und die jeweiligen Parameter gibt Abbildung 4-2.

Kriterium	Versuchstyp	Versuchsdetail	NB-Verfahren	Stahlgüte
Parameter	Kleinversuch	Quersteife	aw	S235
Schweißverfahren	Bauteilversuch	Stumpfstoß	PIT	S355
MAG-Schweißung	Trägerversuch	Längssteife	UIT	S460
UP-Schweißung	Bemerkung		HiFIT	S690
unbekannt	DL			S700
Forschungsprojekt	Kein DL			S720
PIT	GM-Bruch			S960
BAW	Wurzel-Bruch			
SBRI	Nicht berücksichtigt, weil Fehler			
ReFresh	Anschwingspielzahl nicht berücksichtigt			
DAST-HFH	Anriss aus VB nicht detektiert, nicht werten			
HSS-Ermüdung	Spannungsverhältnis R			
Offshore_OW	-1,0			
Leitner5mm	0,1			
Neher2013	0,5			
Marquis2008	0,7			
			Zeitpunkt	
			Nach Schweißvorgang	
			Nach zykl. Vorbelastung	
			Nach Reparatur	
			Nach statischer Druckvorbelastung	
			Nach statischer Zugvorbelastung	
			Hämmern unter Last	
			Nach zyklischer Druckvorbelastung	
			Nach zyklischer Zugvorbelastung	

Abbildung 4-2: Übersicht über Kriterien und Parameter der Datenbank

Figure 4-2: Overview of criteria and parameter of the data base

4.1.5 Beschreibung der Kriterien

4.1.5 Description of criteria

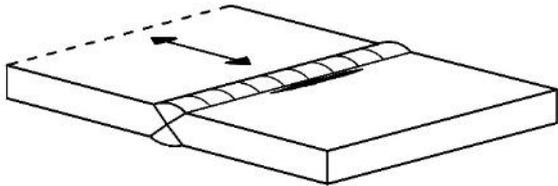
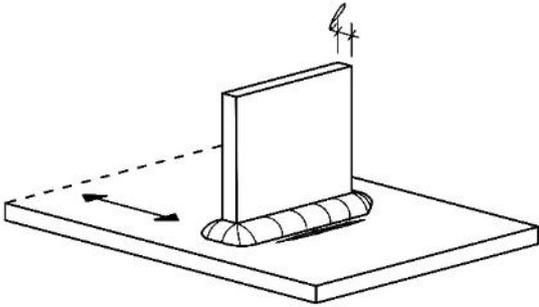
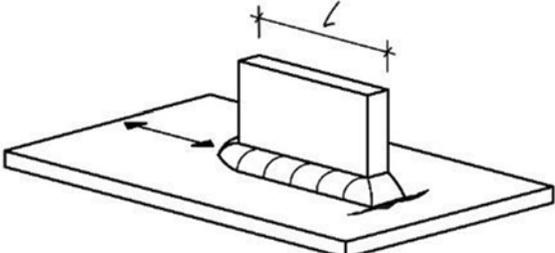
Im Folgenden werden die Kriterien und möglichen zugehörigen Parameter aus Abbildung 4-2 erläutert.

4.1.5.1 Versuchsdetail

Im Wesentlichen lassen sich die bisher untersuchten Versuchskörpervarianten auf die drei in Tabelle 14 dargestellten geschweißten Konstruktionsdetails unbelastete Quersteife, unbelastete Längssteife und querbelasteter Stumpfstoß reduzieren. Die Beschränkung der Untersuchungen auf diese drei Details ist in der Wirksamkeit der HFH-Verfahren begründet, welche nur gegeben ist, wenn das Ermüdungsversagen durch einen Schweißnahtübergangsriss induziert wird (siehe Abbildung 2-1).

Tabelle 14: Übersicht der bisher untersuchten geschweißten Konstruktionsdetails

Table 14: Overview of the until now tested welded construction details

Schematische Darstellung	Beschreibung
	<p>Querbelasteter Stumpfstoß gemäß DIN EN 1993-1-9 [16] Tab.8.3</p>
	<p>Unbelastete Quersteife gemäß DIN EN 1993-1-9 [16] Tab.8.4</p>
	<p>Unbelastete Längssteife gemäß DIN EN 1993-1-9 [16] Tab.8.4</p>

4.1.5.2 Versuchstyp

Das Kriterium Versuchstyp bezieht sich auf die Art bzw. Größe des Versuchskörpers in Hinblick auf die Beurteilung der Relevanz für reale Bauteile. Es wird unterschieden zwischen Kleinversuch, Bauteilversuch und Trägerversuch. Die Kleinversuche sind meist Versuchskörper, die in Reihe mit mehreren Versuchskörpern geschweißt wurden und anschließend getrennt wurden.

So ergeben sich beispielsweise gegenüber Bauteilversuchen meist gutmütigere Eigenspannungszustände. Eine weitere Kategorie ist der Trägerversuch. Hier liegen Eigenspannungszustände vor, die am ehesten dem von realen Konstruktionen entsprechen, wo sich durch den Zusammenbau kritischere Eigenspannungszustände ergeben.

4.1.5.3 Schweißverfahren

Um mögliche Abweichungen durch unterschiedlich angewandte Schweißverfahren zu erkennen wurde das Kriterium Schweißverfahren mit aufgenommen. Üblicherweise wird der Großteil der unbelasteten Quer- und Längssteife mittels MAG-Schweißung hergestellt. Bei der querbelasteten Stumpfnahht kommt es auch zur Anwendung des UP-Verfahrens.

4.1.5.4 Nachbehandlungsverfahren

Es wurde außerdem untergliedert in die unterschiedlichen HFH-Nachbehandlungsverfahren. Neben den in diesem Projekt angewandten HFH-Verfahren HiFIT und PIT, sind in der Datenbank auch Ergebnisse des UIT-Verfahrens (Ultrasonic Impact Treatment) enthalten. Die Datensätze der unbehandelten Datensätze wurden mit aw (as-welded) gekennzeichnet.

4.1.5.5 Stahlgüte

Die Stahlgüten der Versuchskörper aus den vorliegenden Versuchsdaten wurden aufgenommen. Da es sich hierbei hauptsächlich um nationale und europäische Projekte handelt, wurden die Stahlgüten gemäß der Bezeichnung aus DIN EN 10025 [21] aufgenommen.

4.1.5.6 Spannungsverhältnis

Das Spannungsverhältnis R gibt das Verhältnis von Unterspannung σ_U zu Oberspannung σ_O nach Gleichung (4.1) an.

$$R = \frac{\sigma_U}{\sigma_O} \quad (4.1)$$

Die vorliegenden Versuchsdaten enthalten Versuchsergebnisse zu den Spannungsverhältnissen $R = 0,1$; $R = 0,5$; $R = 0,7$ und $R = -1,0$.

4.1.5.7 Forschungsprojekt

Das Kriterium Forschungsprojekt bezieht sich auf die Quelle der vorliegenden Datensätze gemäß den angegebenen Forschungsprojekten in Tabelle 13.

4.1.5.8 Kriterium: Zeitpunkt

Dieses Kriterium trifft eine Aussage bezüglich des Zeitpunkts des Hämmerns bzw. der Versuchsdurchführung.

Nach Schweißvorgang. Der am häufigsten auftretende Fall der eingepflegten Versuche ist eine HFH-Nachbehandlung mit anschließender Versuchsdurchführung nach dem Schweißvorgang. Dieser Fall repräsentiert eine Bauteilfertigung im Werk mit anschließender Nachbehandlung und darauf folgender Anwendung des Bauteils.

Hämmern unter Last bezeichnet die HFH-Anwendung während einer statischen Beanspruchung. Anlass hierfür ist die Frage nach der HFH-Behandlung auf bereits bestehende Bauwerke, bei der die Nachbehandlung nur noch unter Eigengewichtslasten möglich ist.

Nach Reparatur. In diese Sparte wurden Versuchsdaten klassifiziert, bei denen zunächst ein Versagen der unbehandelten Schweißnaht herbeigeführt wurde, entweder durch einen vorhergehenden Ermüdungsversuch oder einen künstlich eingebrachten Riss. Diese wurde reparaturgeschweißt, anschließend HFH-nachbehandelt und im Anschluss geprüft. Diese Art der Versuchsdurchführung spiegelt die Instandsetzung eines Bauteils mit bereits erreichter Lebensdauer wieder, die zur Aufbesserung der reparaturgeschweißten Naht zusätzlich eine HFH-Behandlung erfährt.

Vorbelastungen. Neben den bisher beschriebenen Zuständen enthalten die gesammelten Versuchsdaten auch Datensätze mit unterschiedlichen Arten von Vorbelastungen. In Abbildung 4-3 sind die verschiedenen Vorbelastungsarten im Überblick nach [3] dargestellt.

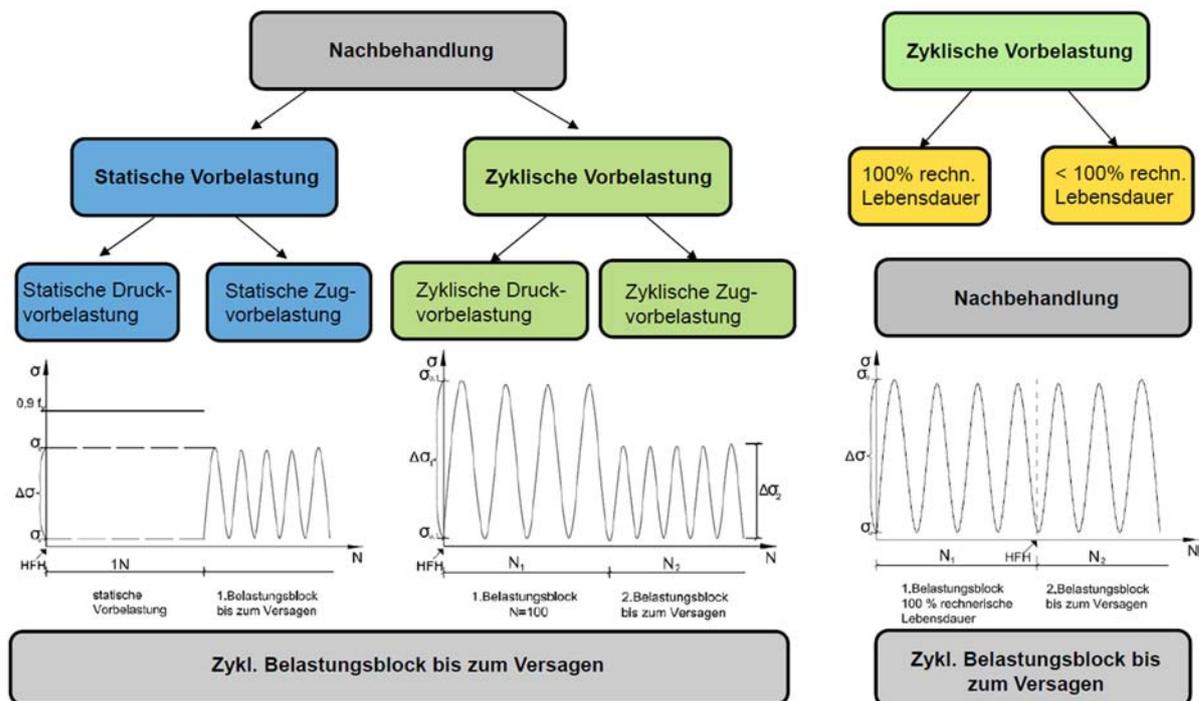


Abbildung 4-3: Arten der Vorbelastung [3]

Figure 4-3: Types of preloads [3]

Die linke Spalte bei der die Nachbehandlung am Anfang steht, dient der Prüfung, ob die eingebrachten Druckeigenspannungen nach verschiedenen Arten von zyklischer und statischer Vorbelastung noch im Bauteil vorhanden sind und die Ermüdungsfestigkeit trotz Vorbelastung gewährleistet ist. Hierbei spielt die Größe der Vorbelastung in Abhängigkeit der Streckgrenze des Werkstoffs eine wesentliche Rolle. Auch die Anzahl der Zyklen spielt eine Rolle, so unterscheidet sich die Lebensdauer einer nur einfach statisch vorbelasteten Probe von Versuchen die eine Vorbelastung von z.B. 100 Zyklen erfahren haben. Dürr [30], Weich [99].

Die rechte Spalte zeigt eine, der Nachbehandlung durch HFH vorangehenden zyklischen Vorbelastung, entweder bis zur 100% rechnerischen Lebensdauer des Konstruktionsdetails oder nur ein Teil dieser Lebensdauer. Ziel der Untersuchungen ist herauszufinden, ob trotz Vorschädigung bis zu 100% rechnerischer Lebensdauer und anschließender Nachbehandlung, eine Ermüdungsfestigkeitssteigerung erzielt werden kann.

Die Nachbehandlungsdatenbank enthält sowohl Versuchsserien zur linken als auch zur rechten Spalte.

4.1.5.9 Bemerkung

Dieses Kriterium liefert eine Aussage zur Gültigkeit oder Besonderheit des Versuchsergebnisses. Beispielsweise wurde hier gekennzeichnet ob es sich nach der Definition der Autoren um einen Durchläufer handelt, oder nicht. Außerdem wurde der Rissausgangsort hier als Parameter aufgenommen, falls dieser vom Schweißnahtübergang abweicht und der Rissausgangsort in der jeweiligen Quelle gegeben war.

Bemerkung	Beschreibung des Parameters
DL	Durchläufer
Kein DL	Kein Durchläufer
GM-Bruch	Bruch vom Grundmaterial ausgehend
Wurzel-Bruch	Bruch von der Schweißnahtwurzel ausgehend
Nicht berücksichtigt, weil Fehler	Versuchsergebnis wird nicht berücksichtigt, weil Fehler bei der Versuchsdurchführung
Anschwingspielzahl nicht berücksichtigt	Anschwingspielzahl wurde bei der Lastspielzahl nicht berücksichtigt
Anriss aus VB nicht detektiert, nicht berücksichtigt	Anriss aus Vorbelastung wurde vor Versuchsdurchführung nicht detektiert und deshalb Versuchsergebnis nicht gewertet

Abbildung 4-4: Beschreibung der Bemerkungen

Figure 4-4: Description of the comments

4.1.6 Eingabe und Abfrage

Die Eingabe der Versuchsdaten erfolgte manuell mittels des in Abbildung 4-5 abgebildeten Versuchsdatenformulars, welches den Eintrag in die Tabelle Versuchsdaten überträgt. Jeder neue Datensatz erhält im Zuge dessen automatisch eine fortlaufende ID, die weiteren Kriterien müssen entsprechend Abbildung 4-2 und dem jeweiligen Forschungsbericht über die Auswahlfelder bestimmt werden.

Die Abfrage wurde mittels der Abfragetabelle gesteuert. Hierfür mussten die jeweiligen gewünschten Parameter ausgewählt werden. Es erfolgt die Ausgabe der Daten in Tabellenform. Im Anschluss können die Daten beispielsweise für die statistische Auswertung in Microsoft Excel exportiert werden.

Tabelle Versuchsdaten	
ID	892
Bezeichnung	RF_S2_16_355_HiFIT_VLZ_6
Forschungsprojekt	ReFresh
Spannungsverhältnis R [-]	0,1
Spannungsschwingbreite [N/mm ²]	188
N [-]	2457610
Versuchstyp	Kleinversuch
Versuchsdetail	Stumpfstoß
NB-Verfahren	HiFIT
Zeitpunkt	Nach zyklischer Zugvorbelastung
N1 [-]	63471
S1 [N/mm ²]	188
S1 von fy [%]	0
Stahlgüte	S355
Schweißverfahren	MAG-Schweißung
Bemerkung	DL
N (Anschwingen)	0

Abbildung 4-5: Eingabe-Formular

Figure 4-5: Input-blank

4.2 Datenumfang nach verschiedenen Kriterien

4.2 Amount of data for different criteria

Dieses Kapitel umfasst die Beschreibung und Veranschaulichung des Umfangs der in der Datenbank enthaltenen Versuchsdaten und deren Verteilung über die verschiedenen Kriterien, bzw. in der Datenbanksprache auch Attribut genannt.

In Tabelle 15 ist die Datenanzahl je Konstruktionsdetail in Abhängigkeit des Behandlungszustands aufgelistet, Abbildung 4-6 veranschaulicht die Proportionen dieser Daten. Sowohl für die querbelastete Stumpfnaht, als auch die unbelastete Quersteife stehen mit 567 und 459 viele Versuchsdaten zu Verfügung. Für die Längssteife sind es lediglich 261 Versuchsdaten.

Tabelle 15: Anzahl der Datenbanksätze nach Konstruktionsdetail

Table 15: Number of data sets relating to construction detail

	AW	HFH	Summe
Quersteife	161	298	459
Längssteife	63	198	261
Stumpfstoß	112	455	567
Gesamt	336	951	1287

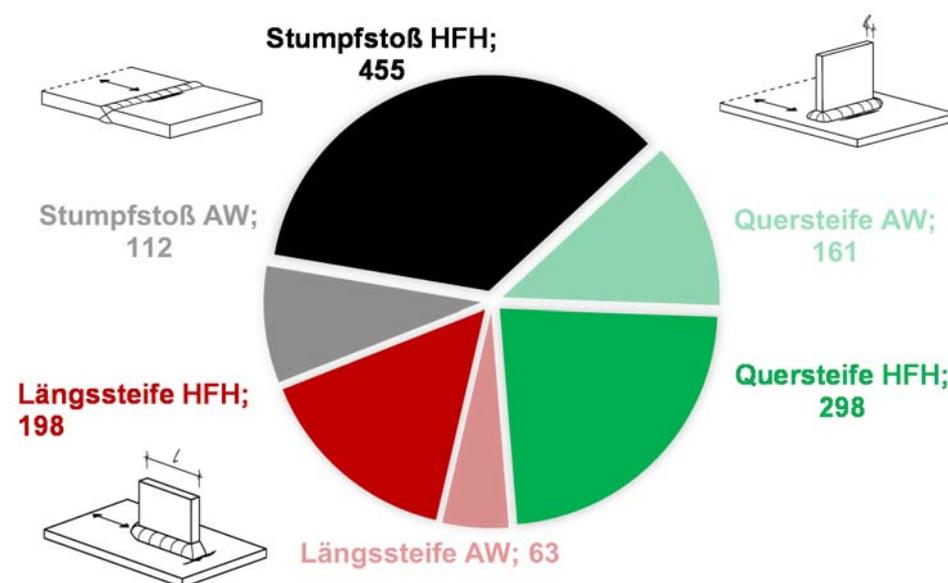


Abbildung 4-6: Darstellung der Anzahl der Datenbanksätze nach Konstruktionsdetail

Figure 4-6: Presentation of the number of data sets relating to construction detail

In Tabelle 16 ist die Datenanzahl je Stahlgüte in Abhängigkeit des Behandlungszustands aufgelistet, Abbildung 4-7 veranschaulicht die Proportionen dieser Daten. Es wird deutlich, dass eine Großzahl der Versuchsdaten für die Stahlgüten S355 und S690 vorliegen. Für die Stahlgüten S235 und S460 beschränkt sich die Anzahl der Versuchsdaten auf 60 und 63 Versuchsergebnisse im nachbehandelten Zustand und 10 und 35 Ergebnisse für den unbehandelten Zustand.

Tabelle 16: Anzahl der Datenbanksätze nach Stahlgüte

Table 16: Number of data sets relating to steel grade

	AW	HFH	Summe
S235	10	60	70
S355	147	402	549
S460	35	63	98
S690	126	370	496
S700	18	28	46
S960	-	28	28
Gesamt	336	951	1287

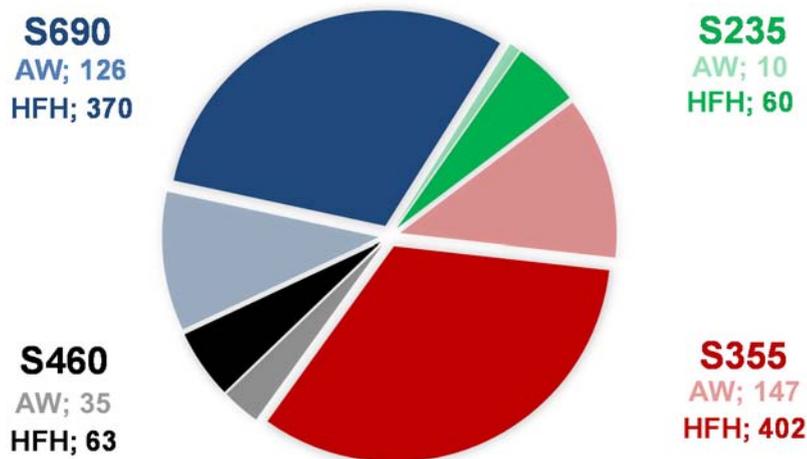


Abbildung 4-7: Darstellung der Anzahl der Datenbanksätze nach Stahlgüte

Figure 4-7: Presentation of the number of data sets relating to steel grade

Tabelle 17: Anzahl der Datenbanksätze nach Nachbehandlungsverfahren

Table 17: Number of data sets relating to post-treatment methods

AW	336
UIT	399
HiFIT	351
PIT	201
Gesamt	1287

Tabelle 18: Anzahl der Datenbanksätze nach Versuchstyp

Table 18: Number of data sets relating to test type

Kleinversuche	1237
Bauteilversuche	7
Trägerversuche	43
Gesamt	

In Tabelle 19 ist die Datenanzahl je Spannungsverhältnis R in Abhängigkeit des Behandlungszustands aufgelistet, Abbildung 4-8 veranschaulicht die Proportionen dieser Daten. Es sticht

hervor, dass eine Vielzahl der Versuchsdaten im Bereich des Spannungsverhältnis $R = 0,1$ liegt und für den kritischeren, aber selten auftretenden Bereich $R \geq 0,5$ lediglich 123 Versuchs-
punkte zur Verfügung stehen.

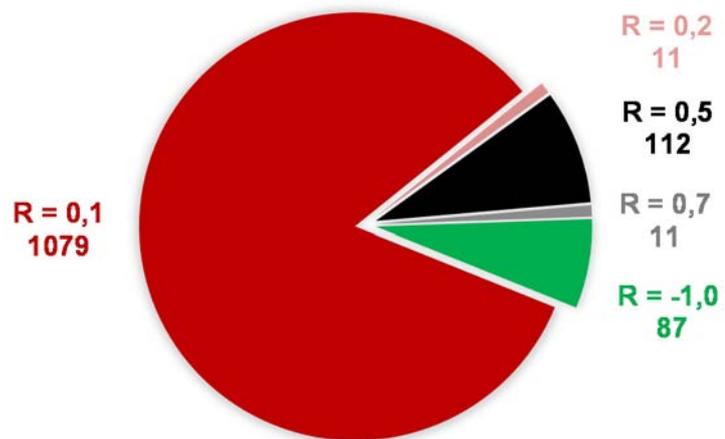
Tabelle 19: Anzahl der Datenbanksätze nach Spannungsverhältnis R

Table 19: Number of data sets relating to the stress ratio R

Spannungsverhältnis R [-]	Anzahl
-1,0	87
0,1	1079
0,2	11
0,5	112
0,7	11

Abbildung 4-8: Darstellung der Anzahl der Datenbanksätze nach Spannungsverhältnis R

Figure 4-8: Presentation of the number of data sets relating to the stress ratio R



4.3 Angaben zur nominellen und reellen Streckgrenze

4.3 Information on nominal and real yield strength

In der Realität gibt es einen Unterschied zwischen der nominellen $f_{y,nom}$ und der reellen am Werkstück vorliegenden Streckgrenze R_{eH} . Da der Grad der Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit durch HFH-Verfahren durch die Streckgrenze beeinflusst wird, könnten Überfestigkeiten einen positiven Effekt auf die Versuchsergebnisse liefern.

Aus diesem Grund, wurden im Laufe des Projekts die reellen Streckgrenzen der vorliegenden Versuchsdaten analysiert. In den meisten Fällen liegt ein Abnahmeprüfzeugnis 3.1 dem Forschungsbericht bei, so dass anhand dessen Tabelle 20 erstellt werden konnte. Die letzte Spalte gibt dabei das Verhältnis der reellen zur nominellen Streckgrenze an. Eine Überfestigkeit ist in jedem Fall zu erkennen, das geht auch aus Abbildung 4-9 hervor. Für die Stahlgütengruppen wurde im Mittel die Abweichung der realen Streckgrenze von der nominellen Streckgrenze ermittelt. Besonders sticht dabei die Gruppe des S235 und S355 heraus, die im Mittel mit ca. 20 % gegenüber den Stahlgüten S460, S690 und S960 mit ca. 4 – 12 % erhöhte reale Streckgrenzen aufweisen. In dieser Auswertung ist die Anzahl der jeweiligen Versuchsdaten, also eine gewisse Gewichtung nicht mit eingeflossen. Das ist aufgrund der teilweise fehlenden Zuordnung einzelner Serien zum jeweiligen Prüfzeugnis nicht möglich.

Tabelle 20: Übersicht nomineller und reeller Streckgrenzen verwendeter Materialien aus genutzten Literaturstellen

Table 20: Overview of nominal and real yield strength of applied materials of used literature

Forschungs- projekt	Nominelle Streckgrenze $f_{y,nom}$	Streckgrenze R_{eH}	Zugfestigkeit R_m	Bruchdeh- nung A5	$R_{eH}/f_{y,nom}$
BAW [61]	235	284	393	39	1,21
P620 [59]	355	398,3	537,2	32	1,12
Refresh [88]	355	434	550	31	1,22
DASSt-HFH	355	401	521	30	1,13
DASSt-HFH	355	447	554	26,4	1,26
PIT [56]	355	441	585	29	1,24
P620 [59]	460	503,5	553,4	28	1,09
P633 [80]	460	537	605	24,5	1,17
P633 [80]	460	491	636	23,9	1,07
P620 [59]	690	812,8	870,8	17	1,18
P620 [59]	690	737,8	794,1	18	1,07
P620 [59]	690	759,8	798,6	19	1,10
P620 [59]	690	774,4	847,9	16	1,12
Refresh [88]	690	719	819	18	1,04
P938 [87]	960	1037	1069		1,08
P938 [87]	960	968	1031		1,01

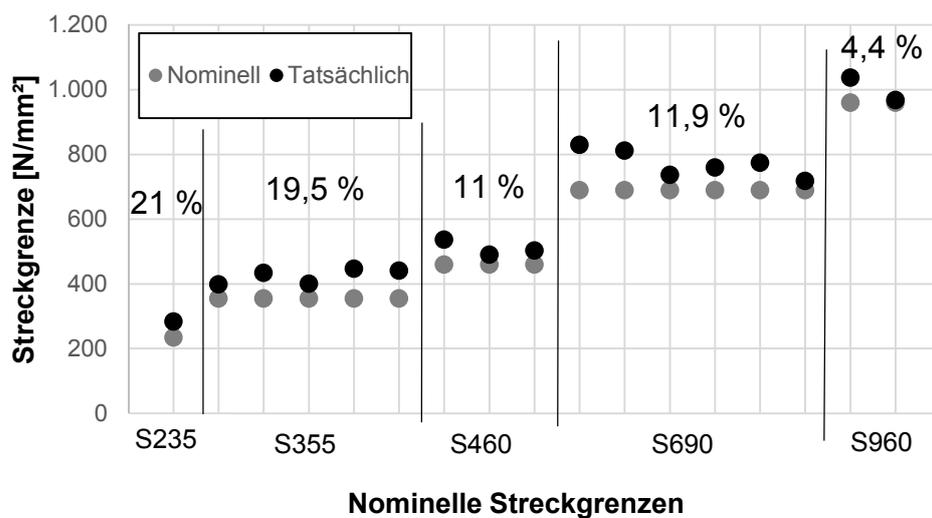


Abbildung 4-9: Vergleich nomineller zu realer Streckgrenze verwendeter Materialien einiger Literaturstellen

Figure 4-9: Comparison of nominal and real yield strength of applied materials of used literature

5 Evaluierung der Bemessungskonzepte

5 Evaluation of design concepts

Kurzfassung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen bereits vorliegenden Bemessungsansätze und -konzepte kurz vorgestellt. Sowohl die einzelnen Einflüsse die durch das jeweilige Konzept Berücksichtigung finden, als auch die Randbedingungen und Anwendungsgrenzen werden betrachtet und evaluiert. Die Evaluierung zielt darauf ab ein modifiziertes und sogleich abgesichertes Bemessungskonzept zu entwickeln.

Dafür werden zunächst die in der Datenbank enthaltenen Versuchsdaten für das jeweilige Kerbdetail entsprechend des evaluierten Kriteriums gefiltert. Im Anschluss werden die erhaltenen Daten statistisch ausgewertet und die beeinflussenden Faktoren diskutiert. In Form einer Gegenüberstellung der ausgewerteten Versuchsdaten aus der Datenbank soll gezeigt werden wie treffend das jeweilige Bemessungskonzept für den untersuchten Aspekt ist und ggf. Lücken und Anwendungsgrenzen identifiziert bzw. bestätigt werden.

Abstract

In this chapter the significant already available design approaches and concepts are shortly introduced. The single influences that are taken into account by the particular concept as also the boundary conditions and application boundaries are considered and evaluated. The evaluation targets developing a modified and forthwith secured design concept.

Therefore the test data are filtered from the data base for the considered fatigue detail according to the evaluated criteria. Afterwards the received data is statistically evaluated and the influencing factors are discussed. In the form of a comparison of the evaluated test data it should be shown how accurate the particular concept is referred to the examined aspects and if necessary gaps and application boundaries should be identified or rather confirmed.

5.1 Vorliegende Bemessungskonzepte

5.1 Existing design approaches

5.1.1 Allgemeines

5.1.1 General

Im Folgenden werden die existierenden Bemessungsansätze nach [59] bzw. [30], [90] bzw. [99], [68] vorgestellt, um einen Überblick zu bekommen. Es werden die Anwendungsgrenzen und Bedingungen genannt, sowie die zugehörigen Formeln und Einflüsse.

Prinzipiell bietet das derzeitige Bemessungskonzept der IIW-Empfehlung [68] außerhalb des bauaufsichtlich geregelten Bereichs das aktuellste Verfahren zur Berücksichtigung der HFH-Verfahren bei der Bemessung nach dem Nennspannungskonzept. Das Bemessungskonzept der IIW-Empfehlung [68] basiert auf den „Recommendations for fatigue design of welded joints and components“ [51].

Aufbauend auf die von Dürr [30] und Weich [99] entwickelten Ansätze wird das IIW-Bemessungskonzept fortlaufend weiterentwickelt und erweitert. Die Bemessungskonzepte nach Dürr und Refresh sind 2006 und 2011 nach deren Stand von den Entwicklern, nicht weiter entwickelt worden.

5.1.2 Bemessungsvorschlag nach Dürr [30]

5.1.2 Design approach according to Dürr [30]

Im Rahmen des Forschungsprojekts [59] und der Dissertation [30] wurde der Bemessungsvorschlag für die Berücksichtigung des Höherfrequenten Hämmerverfahrens UIT bei der Ermüdungsbemessung mit Nennspannungskonzept nach DIN EN 1993-1-9 [16] von Dürr entwickelt.

$$\Delta\sigma_{c,kor} = k_f \cdot k_L \cdot k_R \cdot \Delta\sigma_c \quad (5.1)$$

mit

k_f – Korrekturfaktor für die Streckgrenze f_y

k_L – Korrekturfaktor für den Abstand der Schweißnahtfußpunkte L

k_R – Korrekturfaktor für das Spannungsverhältnis R

Tabelle 21: Ermittlung der Verbesserungsfaktoren k_f , k_L , k_R nach Dürr [30]

Table 21: Determination of improvement factors k_f , k_L , k_R according to Dürr [30]

Stahlsorte	k_f	L	k_L	R	k_R
S355	1,12	$L \leq 25 \text{ mm}$	1,25	$R \leq 0$	1,0
S460	1,25	$25 \text{ mm} < L \leq 35 \text{ mm}$	1,12	$0 < R \leq 0,5$	$1 - \frac{4 \cdot R}{7}$
S690	1,4	$35 \text{ mm} < L \leq 50 \text{ mm}$	1,0	$R > 0,5$	$\frac{10}{7} \cdot (1 - R)$

Dieser beschränkt sich auf das Detail der unbelasteten Quersteife nach DIN EN 1993-1-9 [16], die Stahlsorten S355, S460 sowie S690.

Durch Multiplikation der drei Verbesserungsfaktoren k_f , k_L , k_R in Abhängigkeit der Eigenschaften des Quersteifendetails mit dem ursprünglichen Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit bei 2 Mio. Lastwechsel $\Delta\sigma_c$ ergibt sich die verbesserte Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,kor}$, siehe Gleichung (5.1).

In Tabelle 21 sind die einzelnen Korrekturfaktoren mit den jeweiligen Abstufungen gegeben.

In Abhängigkeit des Abstands der Schweißnahtfußpunkte mit einem Anwendungsbereich von 1 mm bis einschließlich 50 mm, werden drei Geometriekategorien unterschieden. Diese basieren auf numerischen Untersuchungen mittels Kerbspannungskonzept nach Dürr [30], siehe Tabelle 21.

Der Mittelspannungseinfluss wird mittels einer Gleichung in Abhängigkeit des Spannungsverhältnis R zu k_R bestimmt. Die Anwendung des Bemessungskonzepts ist auf Spannungsverhältnisse $R \leq 0,5$ begrenzt, siehe Tabelle 21.

Der Verbesserung durch die Anwendung höherer Stahlgüten, wird durch den Faktor k_f Rechnung getragen, siehe Tabelle 21.

Durch experimentelle Untersuchungen in Dürr [30] konnte der Einfluss von Druckbeanspruchungen auf die Stabilität der durch das Hämmern eingebrachten Eigenspannungen ermittelt werden, so dass in Abhängigkeit der Streckgrenze eine maximale Druckbeanspruchung gegeben werden konnte. Diese beträgt nach Gleichung (5.2) jedoch nur 25 % der Streckgrenze des Werkstücks.

$$\sigma_{min} \leq 0,25 \cdot f_y \tag{5.2}$$

Des Weiteren wird mit Gleichung (5.3) eine maximal erreichbare verbesserte Kerbfallklasse für die HFH-nachbehandelte unbelastete Quersteife gegeben.

$$\Delta\sigma_{c,kor} \leq 125 \text{ N/mm}^2 \tag{5.3}$$

5.1.3 Bemessungsvorschlag Weich [99] / Refresh [90]

5.1.3 Design approach according to Weich [99] / Refresh [90]

Der Bemessungsansatz mittels Nennspannungskonzept konnte in Refresh [90] nur für die untersuchten Kerbfälle Stumpfnah und Längsrippe abgeleitet werden, siehe Tabelle 22. Für die beiden Details wurden Zusätzlich wurden in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses und der Stahlgüte Wöhlerlinien-Neigungen definiert, sowie verbesserte Kerbfallklassen angegeben.

Tabelle 22: Bemessungsvorschlag auf Nennspannungsbasis nach Refresh [90]

Table 22: Design proposal based on nominal stresses according to Refresh [90]

	S355		S690	
	R = 0,1	R = 0,5	R = 0,1	R = 0,5
m	5	9	3	5
Stumpfnah	160	115	170	130
Längsrippe			100	

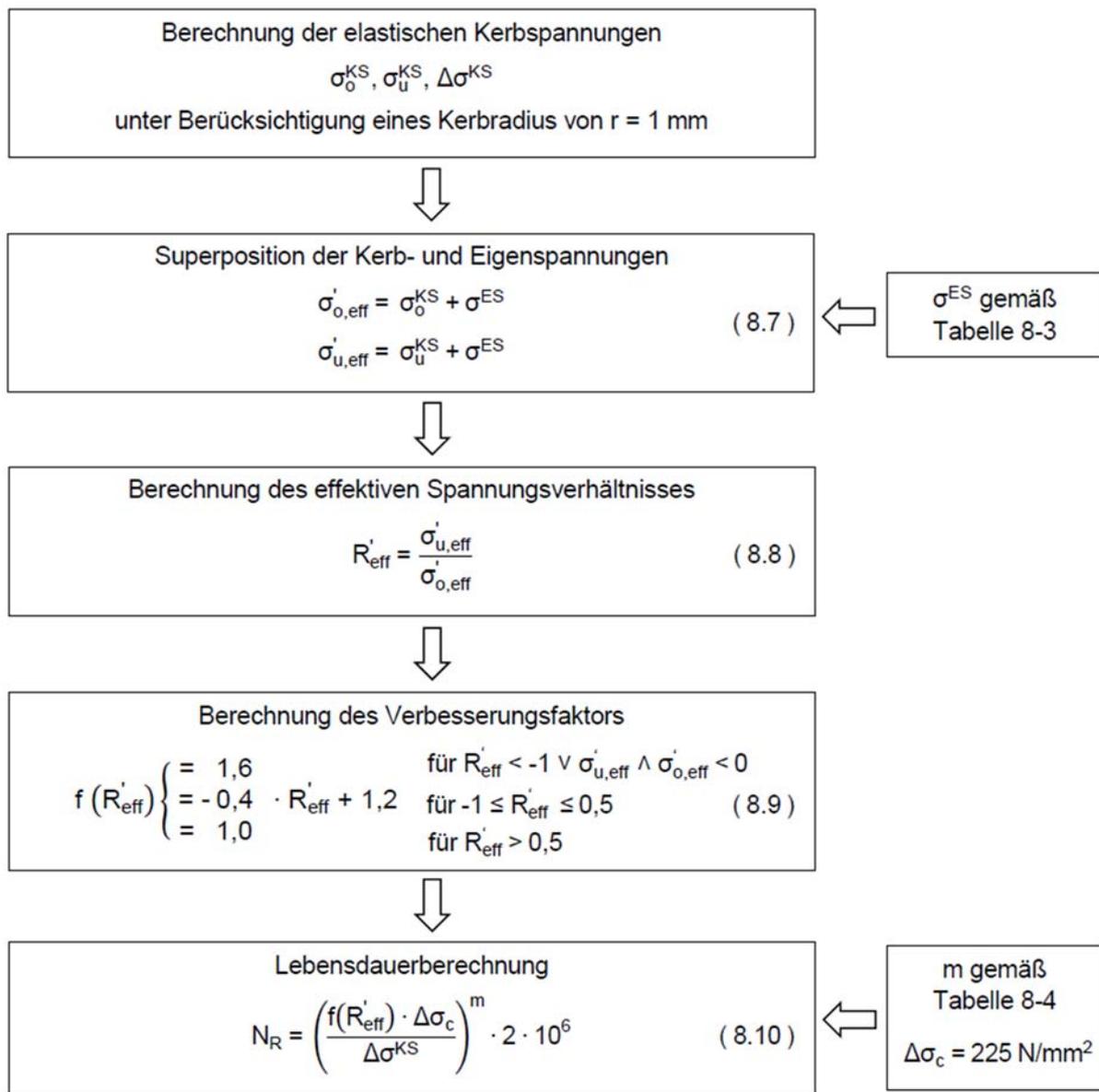


Abbildung 5-1: Lokaler Bemessungsvorschlag nach Weich [99]

Figure 5-1: Local design approach by Weich [99]

Darüber hinaus wurde zur Erweiterung auf weitere Kerbdetails ein lokaler Bemessungsansatz auf Grundlage einer Kerbspannungsbetrachtung vorgeschlagen. Die Methodik dieses Ansatzes effektiver Spannungsverhältnisse ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Allem voran steht eine elastische Kerbspannungsmodellierung unter Berücksichtigung eines Kerbradius von 1 mm. Diese numerisch ermittelte Kerbspannung $\sigma_o^{KS}, \sigma_u^{KS}, \Delta\sigma^{KS}$ wird überlagert mit tabellierten Quereigenspannungen σ^{ES} (gemäß Tabelle 8-3 aus [99]) zu effektiven Beanspruchungen $\sigma'_{o,eff}, \sigma'_{u,eff}$. Daraus kann das effektive Spannungsverhältnis R'_{eff} und in Abhängigkeit dessen der Verbesserungsfaktor $f(R'_{eff})$ bestimmt werden. Der Verbesserungsfaktor wird mit der Ermüdungsfestigkeit für Kerbspannungen multipliziert und durch Division der elastisch ermittelten Kerbspannungsschwingbreite und den Exponent der Wöhlerlinienneigung und Multiplikation mit 2 Millionen erhält man die Lebensdauer des HFH-nachbehandelten Details.

5.1.4 Bemessungsvorschlag nach IIW-Recommendations [68]

5.1.4 Design approach according to IIW-Recommendation [68]

Gegenüber den Bemessungsansätzen nach Dürr [30] und Weich [99] umfasst die Bemessungsempfehlung nach IIW einen großen Anwendungsbereich der sich über den Kerbfallklassenbereich FAT 50 bis FAT 90, basierend auf den *IIW-Recommendations for fatigue design of welded joints and components* [51], definiert. Gemäß den FAT-Klassen in der IIW-Richtlinie sind die Kerbfälle im genannten Bereich für eine Verbesserung geeignet, wenn die zugehörigen Schweißdetails vom Schweißnahtübergang ausgehend reißen. Dies ist in Abbildung 5-2 grafisch dargestellt. Basierend auf dem unbehandelten Referenz-Kerbdetail ist alleine durch die Anwendung der HFH-Verfahren in einem ersten Schritt grundsätzlich eine Verbesserung durch das Anheben von vier FAT-Klassen möglich. In Abhängigkeit der beeinflussenden Parameter wie Stahlgüte und Spannungsverhältnis kann die abschließende verbesserte Ermüdungsfestigkeit bestimmt werden.

So ist die Abstufung zwischen den einzelnen Einflussparametern ausführlich. So wird beispielsweise zwischen fünf verschiedenen Stahlgüten differenziert, siehe Abbildung 5-3.

Auch zum Einfluss des Spannungsverhältnis, also den Mittelspannungseinfluss werden vier verschiedene Klassen differenziert bzw. eine klare Anwendungsgrenze der Richtlinie ab $R = 0,52$ genannt.

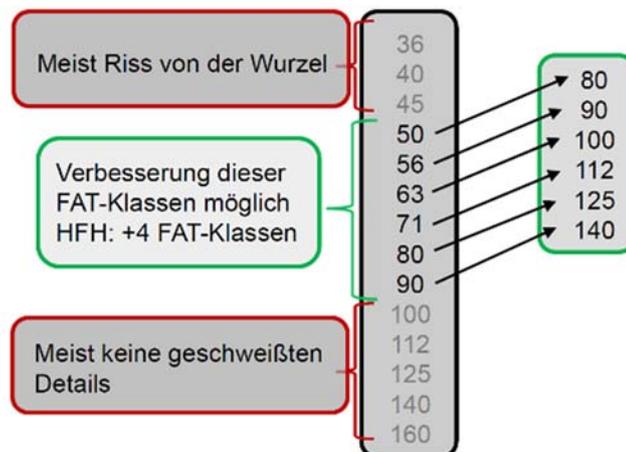


Abbildung 5-2: Anwendungsbereich und Verbesserungszuwachs durch HFH nach IIW-Empfehlungen [68]

Figure 5-2: Scope and improvement steps through HFMI according to IIW-Recommendation [68]

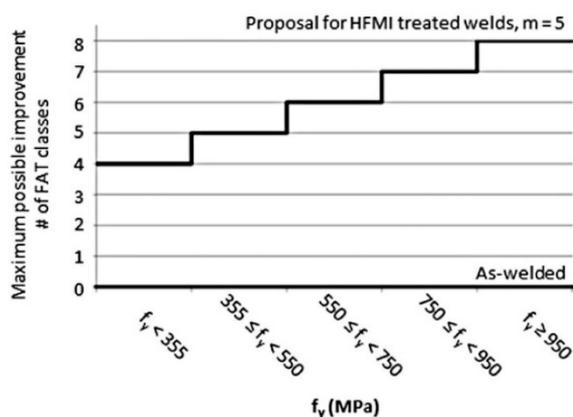


Abbildung 5-3: Stahlgütenabhängigkeit nach IIW-Empfehlungen [68]

Figure 5-3: Steel grade dependence according to IIW-Recommendation [68]

R ratio	Minimum FAT class reduction
$R \leq 0.15$	No reduction due to stress ratio
$0.15 < R \leq 0.28$	One FAT class reduction
$0.28 < R \leq 0.4$	Two FAT classes reduction
$0.4 < R \leq 0.52$	Three FAT classes reduction
$0.52 < R$	No data available. The degree of improvement must be confirmed by testing

Abbildung 5-4: Mittelspannungseinfluss nach IIW-Empfehlungen [68]

Figure 5-4: Effect of the mean stress according to IIW-Recommendations [68]

f_y (MPa)	N (cycles)
$f_y < 355$	72,000
$355 \leq f_y < 550$	30,000
$550 \leq f_y < 750$	12,500
≥ 750	<10,000

Abbildung 5-5: Mindestlastzyklen nach IIW-Empfehlungen [68]

Figure 5-5: Minimum of load cycles according to IIW-Recommendations [68]

Gültigkeit. Aufgrund der flacheren Wöhlerlinienneigung von $m = 5$ für HFH-nachbehandelte Konstruktionen gegenüber dem unbehandelten Zustand von $m = 3$ ist die Wirksamkeit in Abhängigkeit der Stahlgütekategorien beschränkt durch eine Mindestlastwechselzahl. Diese Lastwechselzahlen entsprechen dem Schnittpunkt der Wöhlerlinien verschiedener Kerbklassen mit der unbehandelten Kerbklassen-Linie für FAT90. So ergibt sich ein Schnittpunkt bei 72.000 Lastwechsel (siehe Abbildung 5-5). Auf die Anwendungsgrenzen in Hinblick auf die Höhe der Beanspruchung wird in Abschnitt 5.5.1.3 näher eingegangen.

HFH-Verfahren. Neben der Beanspruchung, stellt sich die Frage für welche HFH-Verfahren die IIW-Empfehlung gelten darf. Experimentelle Untersuchungen von Yildirim et al. [102] mittels

Round Robin-Versuchen unter Betriebsbelastung haben gezeigt, dass bei HFH-nachbehandelten Quersteifenprobekörper unter Anwendung von vier HFH-Verfahren von unterschiedlichen Herstellern (HiFIT, UIT, UP und UPT) alle Versuchsergebnisse die nach IIW-Richtlinie empfohlene Kerbklasse von 160 N/mm^2 bei 2 Millionen Lastwechsel erreichen konnte. Eine Art Klassifizierung der Wirksamkeit der unterschiedlichen Verfahren wurde in Yildirim et al. [102] nicht durchgeführt.

In der IIW-Empfehlungen sind die derzeit weltweit angewandten Verfahren UIT, UP, HiFIT und PIT abgebildet. Mit der Ergänzung, dass für nicht aufgeführte Verfahren ebenso die Empfehlung gelten kann, wenn deren Wirkungsweise und Ermüdungszuwachs in gleich verlässlichem Maße durch objektive Prüfung nachgewiesen werden konnte.

5.2 Quersteife - Evaluierung der Bemessungsansätze nach Einflusskriterien

5.2 Transverse attachment - Evaluation of design approaches regarding influencing factors

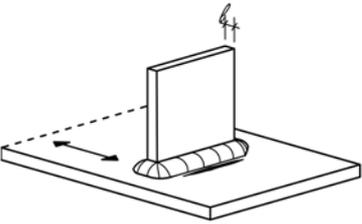
5.2.1 Mittelspannungseinfluss- und Streckgrenzeinfluss

5.2.1 Mean stress and yield strength effects

Mittelspannungseinfluss. Im Folgenden wird an den vorhandenen Versuchsdaten der Quersteife der Einfluss der Mittelspannung gezeigt. Tabelle 23 zeigt eine Übersicht über die Anzahl und Kriterien der vorliegenden Daten aus der Datenbank für die Quersteife hinsichtlich eines variierenden Spannungsverhältnisses R. Es wird deutlich, dass hauptsächlich für die Werkstoffe S355 und S690 Daten mit variierendem Spannungsverhältnis R vorliegen. Deshalb wird an den Stahlgüten S355 und S690 sowohl im behandelten als auch im unbehandelten Zustand der Einfluss der Mittelspannung veranschaulicht.

Tabelle 23: Übersicht der Datengrundlage zum Mittelspannungs- und Streckgrenzeinfluss der Quersteife

Table 23: Overview of data base of transverse attachment with regard to mean stress and yield strength effects

		Anzahl der jeweils vorliegenden Versuchsdaten [-] *(inkl. DL, ohne Großbauteilversuche, nur „nach Schweißvorgang“)		
		R [-]		
Stahlgüte nach DIN EN 10025	Nachbehandlung	-1,0	0,1	0,5
S235	AW		10	
	HFH		15	
S355	AW	8	53	
	HFH	11	73	4
S460	AW		27	
	HFH		38	
S690	AW	12	35	6
	HFH	7	37	14
S960	HFH			

Zunächst (Abbildung 5-6) wird der Mittelspannungseinfluss über die vorhandenen aw-Versuche an S355 dargestellt. Es liegen Ergebnisse für das Spannungsverhältnis $R = 0,1$ und $R = -1$ vor. Es lässt sich deutlich erkennen, dass selbst im unbehandelten Zustand die Versuche die

im Wechsellastbereich durchgeführt wurden höhere Werte zeigen, als die unter Schwellbeanspruchung. Abbildung 5-7 zeigt die Ergebnisse für HFH-nachbehandelte Versuchsdaten. Hier wird die Differenz durch das angewandte Spannungsverhältnis noch deutlicher. Hinzu kommen die unter Spannungsverhältnis $R = 0,5$ geprüften Versuche, die deutlich geringere Lebensdauern erreichen als unter $R = 0,1$.

Abbildung 5-8 zeigt die Versuchsergebnisse am unbehandelten S690 mit den Spannungsverhältnissen $R = -1,0$, $R = 0,1$ und $R = 0,5$. Hier liegen die unter Wechselbeanspruchung geprüften Versuchsergebnisse im oberen Streubereich. Die Versuchsergebnisse der hohen Zug-schwellbeanspruchung $R = 0,5$ grenzen sich nicht sehr deutlich von denjenigen mit Spannungsverhältnis $R = 0,1$ ab.

Noch ausgeprägter erscheint der Mittelspannungseinfluss jedoch in Abbildung 5-9 anhand der HFH-behandelten Versuchsergebnisse.

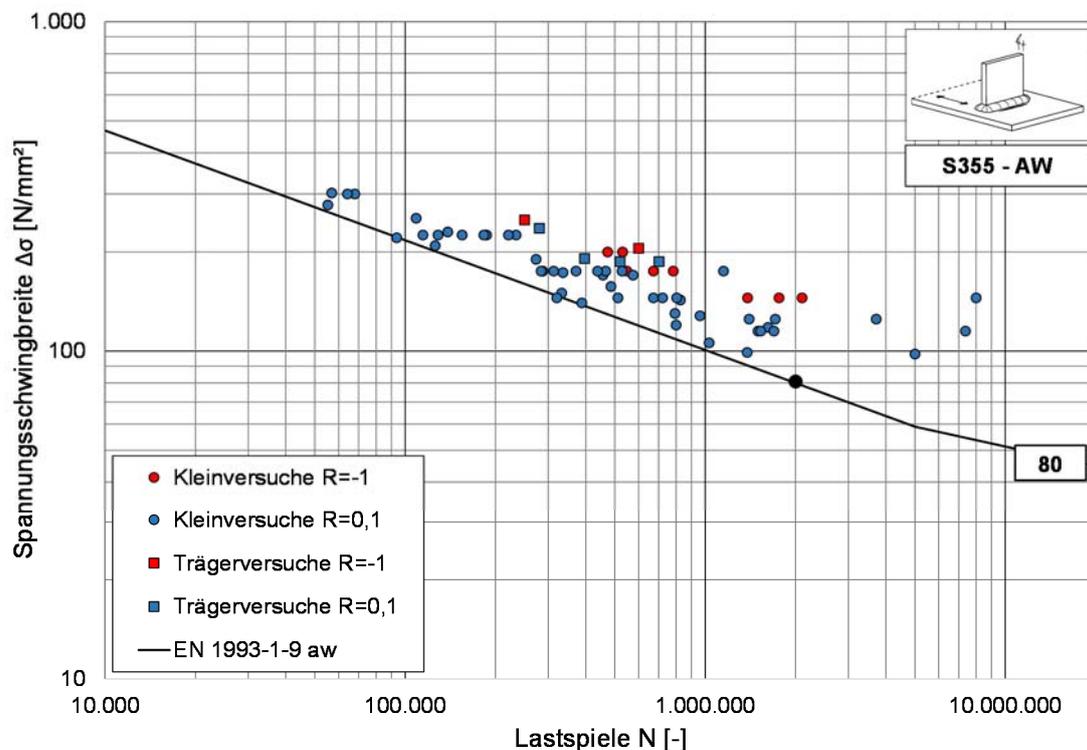


Abbildung 5-6: Mittelspannungseinfluss an un behandelter Quersteife am S355

Figure 5-6: Mean stress effect on untreated transverse stiffeners S355

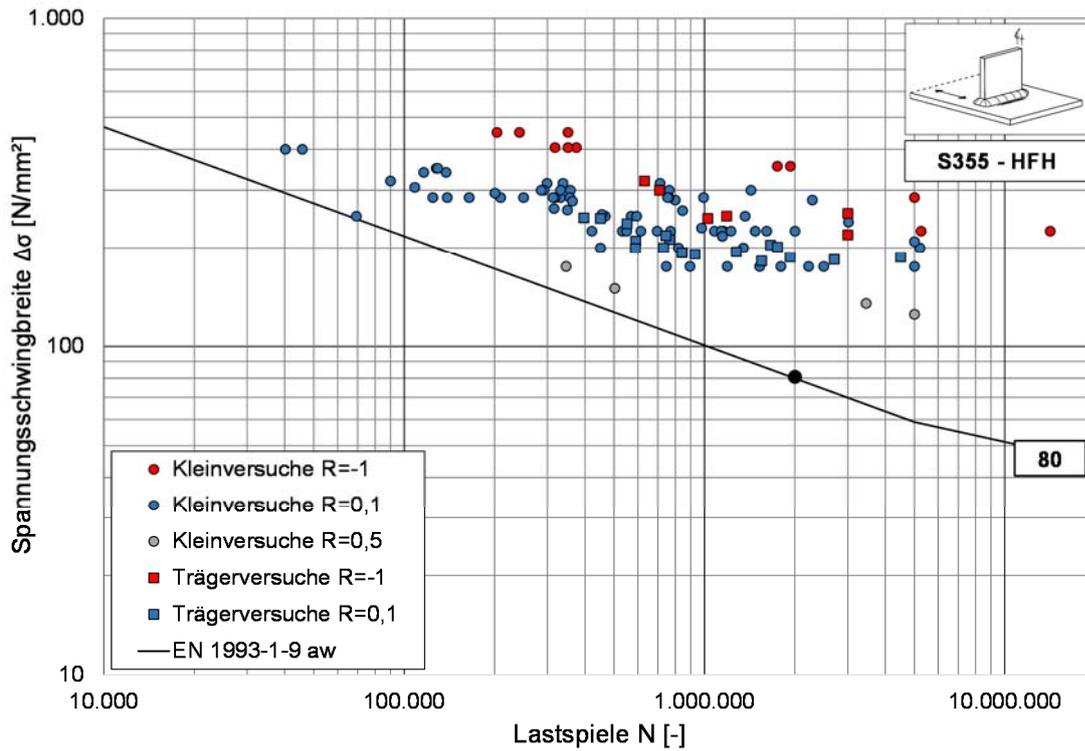


Abbildung 5-7: Mittelspannungseinfluss an HFH-behandelter Quersteife am S355

Figure 5-7: Mean stress effect on HFH-treated transverse stiffeners S355

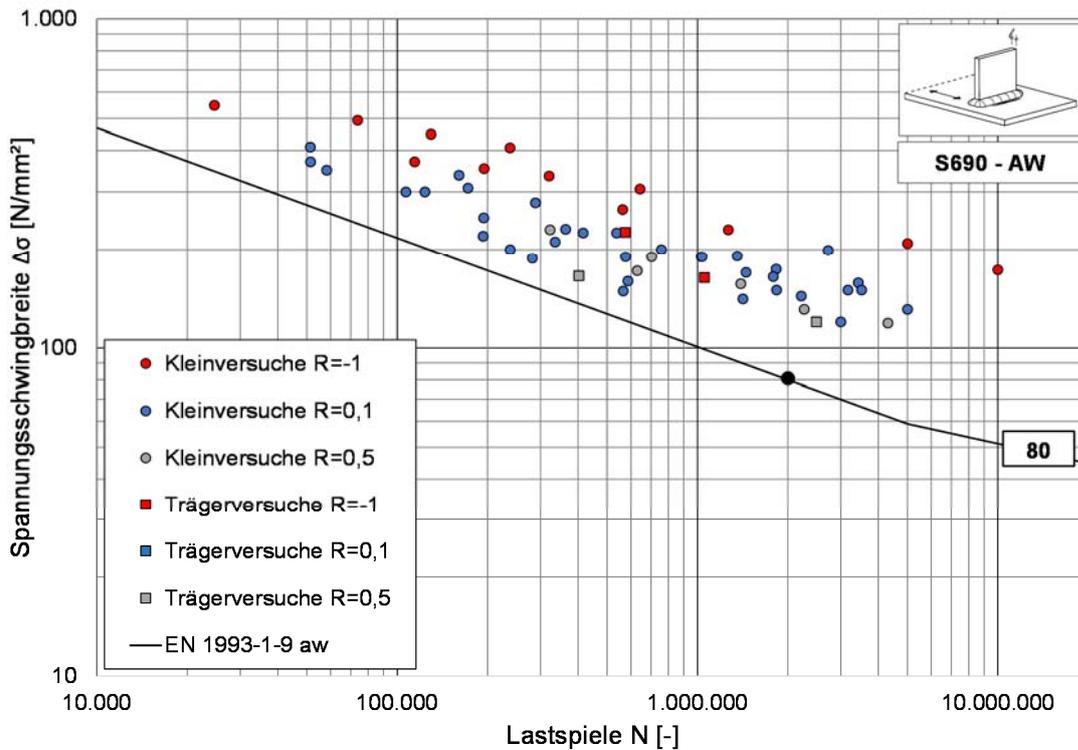


Abbildung 5-8: Mittelspannungseinfluss an unbehandelter Quersteife am S690

Figure 5-8: Mean stress effect on untreated transverse stiffeners S690

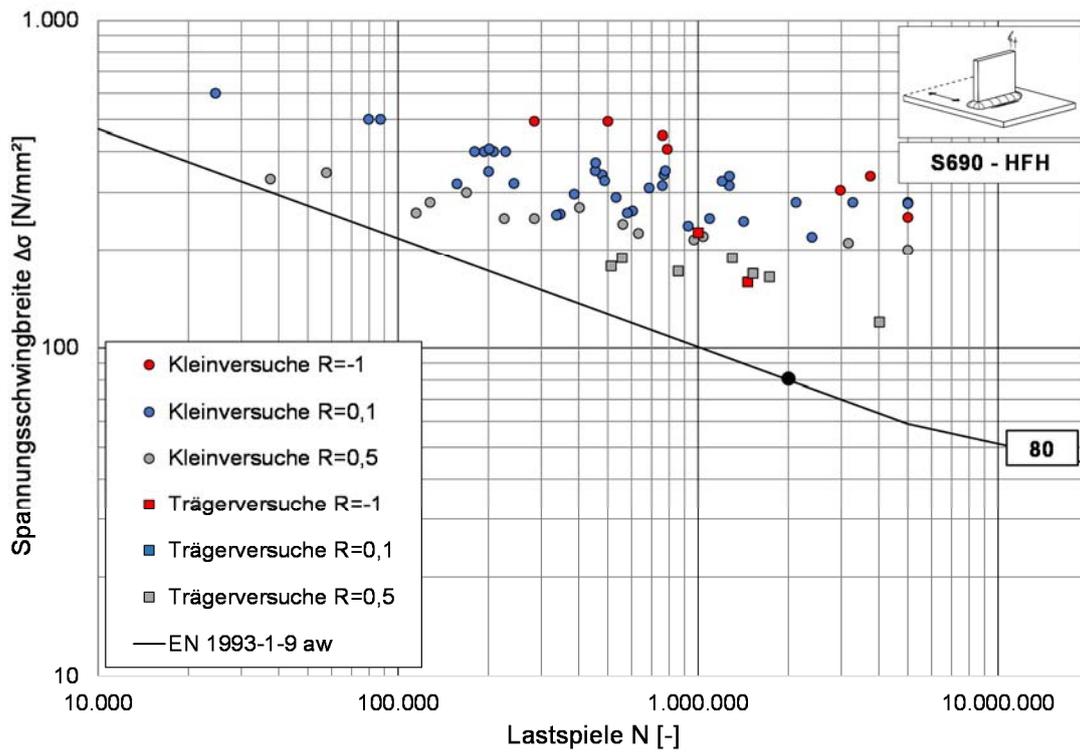


Abbildung 5-9: Mittelspannungseinfluss an HFH-behandelter Quersteife am S690

Figure 5-9: Mean stress effect on HFH-treated transverse stiffeners S690

Tabelle 24: Auswertung des Mittelspannungs – und Streckgrenzeinflusses der Quersteife

Table 24: Evaluation of transverse attachment with regard to mean stress and yield strength effects

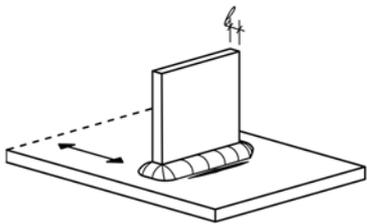
		Bezugswert der Spannungsschwingbreite bei 2×10^6 LW $\Delta\sigma_c$ [N/mm ²] (m) (N _{Versuche})			m	
		R [-]				
Stahlgüte nach DIN EN 10025	Nachbehandlung	-1,0	0,1	0,5		
S235	AW		81,9 (3,0) (8)		variabel	
	HFH		182,3 (11,8) (12)			
S355	AW	122,3 (4,0) (8)	83,6 (3,2) (49)			
	HFH	305,4 (8,1) (8)	134,4 (3,7) (65)	111,1 (8,7) (4)		
S460	AW		80,5 (3,1) (26)			
	HFH		139,1 (4,9) (19)			
S690	AW	162,9 (4,0) (10)	107,4 (3,6) (31)	121,3 (3,8) (6)		
	HFH	293,8 (4,8) (6)	155,0 (3,6) (34)	170,3 (7,2) (13)		
S960	HFH		205,8 (3,8) (9)			
S235	AW		83,8 (3,0) (8)			fix
	HFH		103,9 (5,0) (12)			
S355	AW	105,5 (3) (8)	78,5 (3) (49)			
	HFH	234,3 (5) (8)	156,7 (5) (65)	90,5 (5) (4)		
S460	AW		77,6 (3) (26)			
	HFH		142,0 (5) (19)			
S690	AW	115,0 (3) (10)	91,9 (3) (31)	108,1 (3) (6)		
	HFH	305,7 (5) (6)	188,2 (5) (34)	134,7 (5) (13)		
S960	HFH		251,1 (5) (9)			

Tabelle 24 zeigt die Übersicht der Auswertung mittels linearer Regression nach [84] (siehe Kapitel 3.2) der Versuchsdaten zur Quersteife mit variierendem Spannungsverhältnis. Es wurde sowohl unter variabler als auch unter fixer Wöhlerlinienneigung ausgewertet. Gegeben sind die ermittelten Spannungsschwingbreiten, sowie in Klammern die Werte der variablen und fixen Neigung und die zugrunde gelegte Anzahl an Versuchsergebnissen.

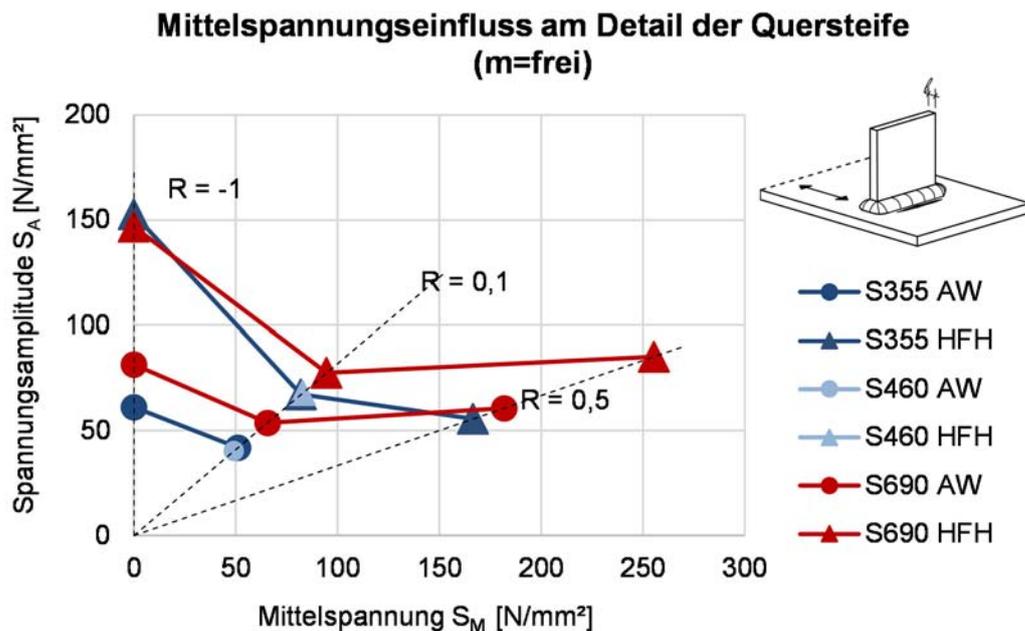


Abbildung 5-10: Mittelspannungseinfluss der Quersteife (m = var.) [3]

Figure 5-10: Mean stress effect of the transverse stiffener (m = var) [3]

Abbildung 5-10 zeigt die Darstellung aus [3] in Form eines Haigh-Diagramms, die Darstellung anhand von Haigh-Diagrammen wurde in [3] gewählt, da diese eine direkte Beurteilung der Mittelspannungsempfindlichkeit zulassen.

Im Haigh-Diagramm (Abbildung 5-10) sind die mit variabler Wöhlerlinienneigung ausgewerteten Serien aus Tabelle 24 aufgetragen. Daraus wird deutlich, dass es für alle dargestellten Serien unabhängig vom Nachbehandlungszustand einen Mittelspannungseinfluss gibt.

Deutlich wird der Einfluss der Mittelspannung am Unterschied zwischen Zugschwellbelastung $R = 0,1$ und den wechselbeanspruchten Serien mit $R = -1,0$ für alle Stahlgüten. Besonders ausgeprägt ist die positive Wirkung der Wechselbeanspruchung jedoch im HFH-nachbehandelten Zustand.

Die Ergebnisse der Serien mit dem Spannungsverhältnis $R = 0,5$ zeigen für alle Behandlungszustände bessere Werte als allgemein erwartet. Für die Stahlgüte S690 liegt sowohl die Festigkeit der unbehandelten als auch der HFH-behandelten Serie geringfügig über der Ermüdungsfestigkeit der unter $R = 0,1$ zugschwellbeanspruchten Serien. Dieses gutmütige Ergebnis für $R = 0,5$ mag einer relativ flachen Neigung der Versuchsserien geschuldet sein.

Die Darstellung aus Abbildung 3-40 zeigt ein idealisiertes Verhalten, dass den Eigenspannungsabbau bei Erreichen der Streckgrenze f_y unabhängig von der Quantität und unabhängig

vom Vorzeichen der Beanspruchung unterstellt. Diese Annahme ist unter realen Bedingungen nicht gegeben.

Zum einen verhält sich der Eigenspannungsabbau unterschiedlich unter Druck- und Zugbeanspruchung, zum andern spielt die Häufigkeit der Belastung eine wesentliche Rolle.

Die stärkere Ausprägung des Mittelspannungseinfluss für HFH-nachbehandelte mag an dem verzögerten Eigenspannungsabbau aufgrund der lokalen Zunahme der Streckgrenze sein. Eigenspannungsmessungen nach verschiedenen Laststufen am Stumpfstoß durch Weich [99] haben bestätigt, dass beispielsweise für den S355J2 ein Eigenspannungsabbau erst bei einer Beanspruchung 15% über der realen Streckgrenze auftrat.

Streckgrenzeinfluss. Die Abbildung 5-11 zeigt die Versuchsdaten unbehandelter Quersteinversuche in Abhängigkeit der Streckgrenze unter Zugschwellbeanspruchung $R = 0,1$ im Vergleich zur nach DIN EN 1993-1-9 [16] ansetzbaren Ermüdungsfestigkeit. Es lässt sich feststellen, dass die Versuchsergebnisse der Serie S235 und S355 und S460 eine gute Übereinstimmung mit der nach Norm geforderten Ermüdungsfestigkeit liefern. Ein gewisser Puffer der Versuchsergebnisse für die Stahlgüte S690 gegenüber normalfesten Stählen, bzw. die Wöhlerlinie nach Norm lässt sich erahnen. Es zeigt sich für alle im Schweißzustand belassenen Serien eine gute Übereinstimmung mit der Wöhlerlinienneigung von $m = 3$.

Das durch die HFH-Anwendung verbesserte Ermüdungsverhalten der unbelasteten Quersteife ist in Abbildung 5-12 deutlich zu erkennen. Das äußert sich zum einen durch eine Verschiebung der Wöhlerlinie, zum andern erzeugen die nachbehandelten Versuchsdaten eine Verdrehung der Wöhlerlinie, so dass eine flachere Neigung zu Stande kommt. Eine Stahlgütenabhängigkeit für die HFH-behandelten Versuche wird deutlich, so kann man die einzelnen Streubänder der unterschiedlichen Werkstoffe in Abbildung 5-12 erkennen. Der Effekt scheint wesentlich ausgeprägter als bei den unbehandelten Versuchsdaten aus Abbildung 5-11.

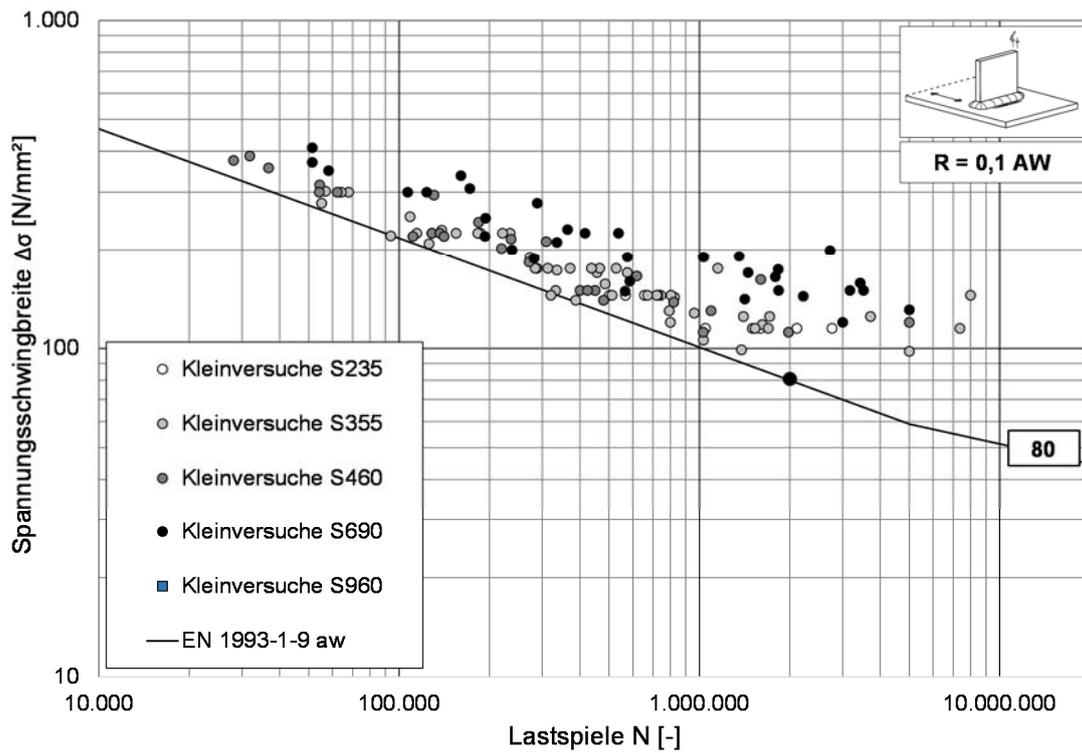


Abbildung 5-11: Streckgrenzeinfluss an unbehandelter Quersteife unter Spannungsverhältnis $R = 0,1$

Figure 5-11: Effect of the yield strength on untreated transverse stiffener with stress ratio $R = 0.1$

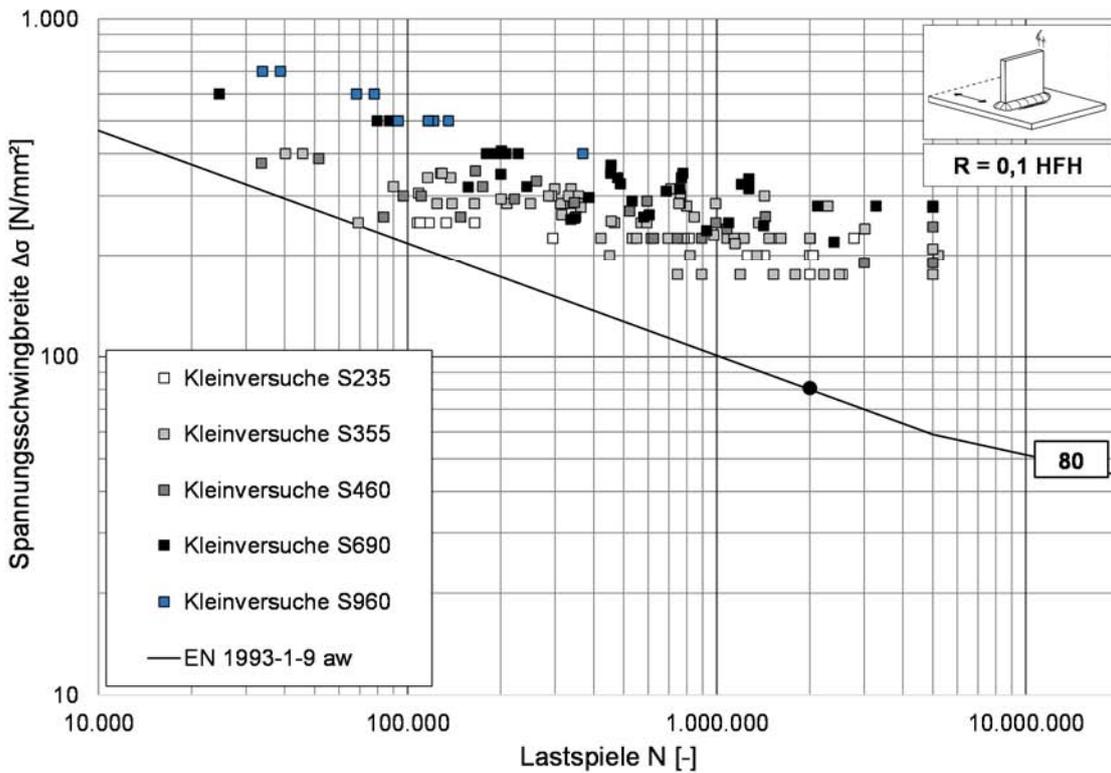


Abbildung 5-12: Streckgrenzeinfluss an HFH-behandelter Quersteife unter Spannungsverhältnis $R = 0,1$

Figure 5-12: Effect of the yield strength on HFMI-treated transverse stiffeners with stress ratio $R = 0.1$

Abbildung 5-13 stellt die ausgewerteten Serien in Abhängigkeit des Behandlungszustands und der Stahlgüte für das Spannungsverhältnis $R = 0,1$ unter Annahme einer freien Wöhlerlinienneigung für die unbelastete Quersteife dar. Ein Ermüdungszuwachs für alle geprüften Stahlgüten, gegenüber dem unbehandelten Zustand kann bestätigt werden. Ungewöhnlich hoch ist die erreichte Ermüdungsfestigkeit der HFH-nachbehandelten Serie am Baustahl S235 aus [61]. Für die weiteren Stahlgüten lässt sich im HFH-nachbehandelten Zustand eine zunehmende Steigerung der Festigkeit erkennen.

Die Ermüdungsfestigkeiten der unter Wechselbeanspruchung $R = -1,0$ getesteten Serien in Abhängigkeit des Behandlungszustands und der Stahlgüte sind in Abbildung 5-14 gegeben. Die Datengrundlage ist, wie in Kapitel 4.2 angedeutet, gering. Für die unbelastete Quersteife zeigt sich auch hier ein Einfluss aus variierender Streckgrenze, so dass für S690 ein größerer Widerstand erreicht wird, als für den normalfesten Baustahl S355. Bei Gegenüberstellung der HFH-behandelten Serie fällt auf, dass der Widerstand der Serie S355 einen geringfügig größeren Wert erreicht als die Serie S690, was sehr ungewöhnlich ist. In Tabelle 24 wird deutlich, dass die Serie S355 eine relativ flache freie Neigung von $m_{\text{frei, S355}} = 8$ im Gegensatz zur eher üblichen freien Neigung der Serie S690 von $m_{\text{frei, S690}} = 4,9$ erreicht. Alles in allem, liegen die Ergebnisse auf der sicheren Seite und weisen Überfestigkeiten auf.

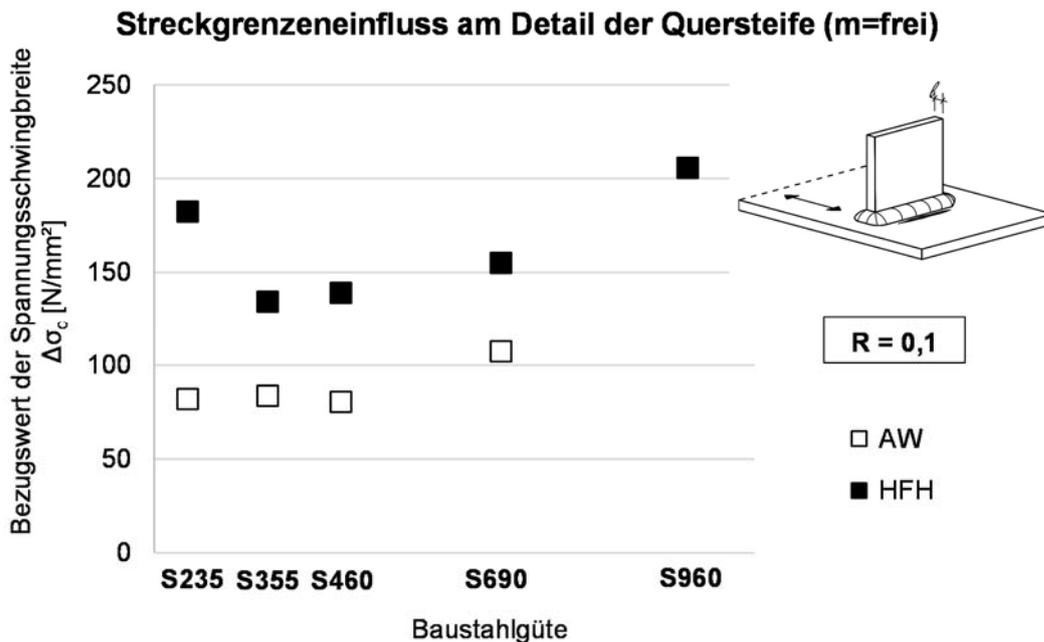


Abbildung 5-13: Streckgrenzeinfluss an un behandelter und HFH-behandelter Quersteife unter Spannungsverhältnis $R = 0,1$ und freier Wöhlerlinienneigung m_{frei} [3]

Figure 5-13: Effect of the yield strength on untreated and HFMI-treated transverse stiffeners with stress ratio $R = 0.1$ and free slope of the Wöhler curve m_{free} [3]

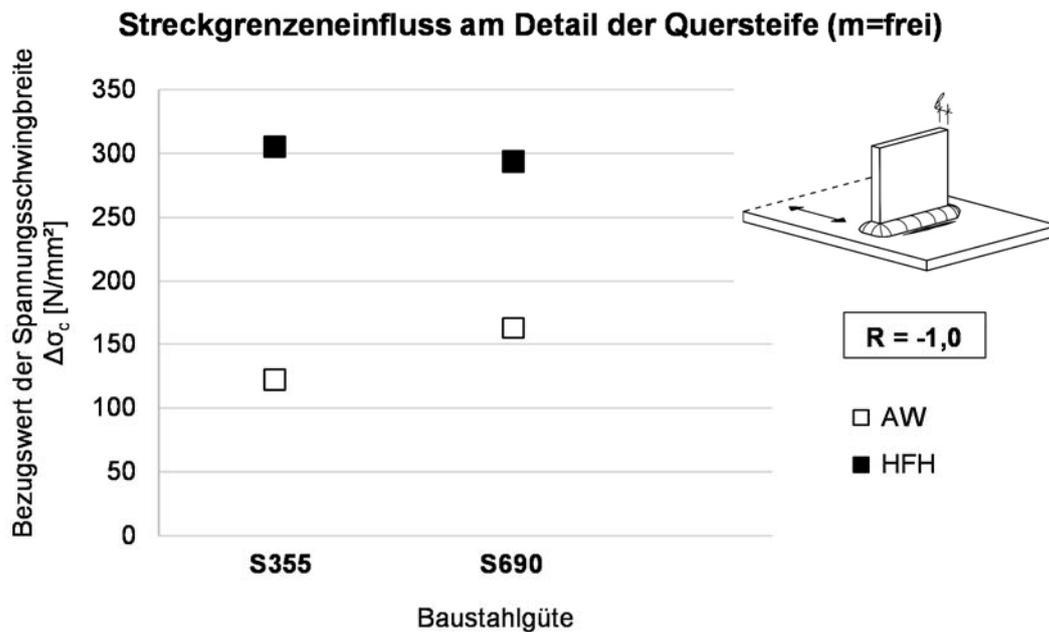


Abbildung 5-14: Streckgrenzeinfluss an unbehandelter und HFH-behandelter Quersteife unter Spannungsverhältnis $R = -1,0$ und freier Wöhlerlinienneigung m_{frei} [3]

Figure 5-14: Effect of the yield strength on untreated and HFMI-treated transverse stiffeners with stress ratio $R = -1.0$ and free slope of the Wöhler curve m_{free} [3]

5.2.2 Gegenüberstellung zur IIW- Empfehlung

5.2.2 Comparison to IIW-Recommendations

Abbildung 5-15 zeigt die Gegenüberstellung der ausgewerteten Serien mit fixer Neigung gemäß Tabelle 24 im Vergleich zu denjenigen vom IIW-vorgeschlagenen Bemessungswerten [68] für den nachbehandelten Zustand in Abhängigkeit der Streckgrenze f_y und des Spannungsverhältnisses R nach [3]. Der Vergleich wird auf Basis der Auswertung mit fixer Neigung durchgeführt, da auch die Festigkeiten in der Empfehlung auf fixen Neigungen beruhen, so erscheint der Vergleich konsistent.

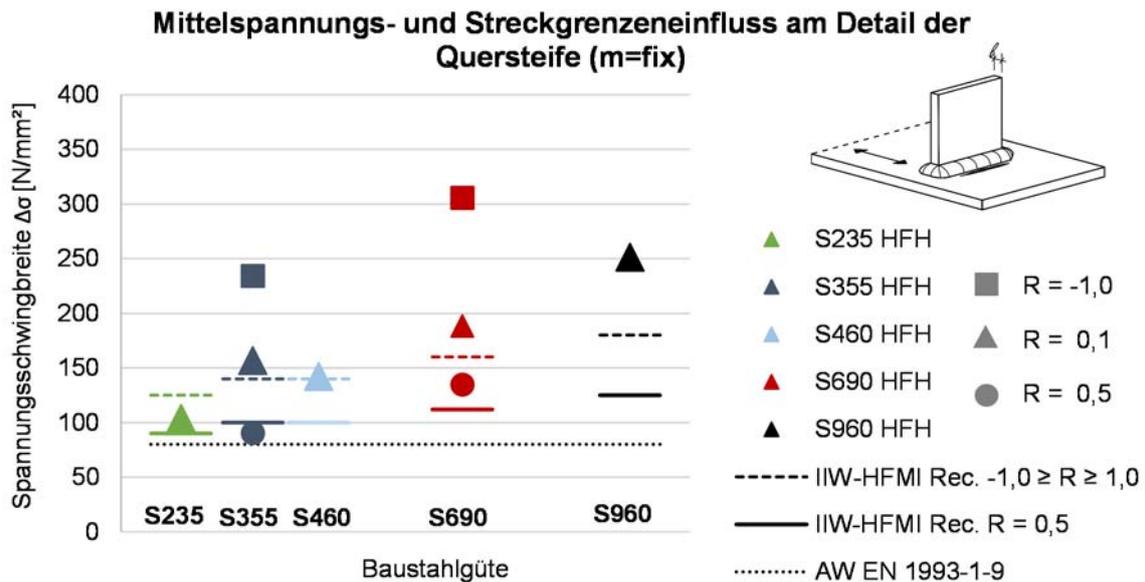


Abbildung 5-15: Streckgrenzen- und Mittelspannungseinfluss anhand der Gegenüberstellung zu den Ermüdungsfestigkeiten der IIV-Empfehlungen an der HFH-nachbehandelten Quersteife ($m_{HFH} = \text{fix}$) [3]

Figure 5-15: Yield strength- and mean stress influence in comparison to proposed detail categories of IIV-Recommendations for HFMI-treated transverse stiffener ($m_{HFMI} = \text{fix}$) [3]

Es wird deutlich, dass die Widerstände für die Spannungsverhältnisse $R = 0,1$ und $R = 0,5$ in Abhängigkeit der Stahlgüten dicht bei den Ergebnissen der Auswertung der Versuchsdaten liegen. Außerdem fällt auf, dass eine Wechselbeanspruchung für die Quersteife für beide betrachteten Werkstoffe sehr viel günstigere Ergebnisse liefert als für die Zugschwellbeanspruchung unter $R = 0,1$. Die IIV-Empfehlungen bieten hierfür keinen zusätzlichen begünstigenden Bemessungsansatz an. Unter Anwendung von HFH-Verfahren wird die Ermüdungsfestigkeit deutlich mittelspannungsempfindlicher, so dass hier durchaus ein positive Wirkung zu erkennen ist, die durch die existierenden Empfehlungen noch nicht ausgeschöpft wurde. Unter Wechselbeanspruchung zeigen sowohl die Stahlgüte S355, als auch die Stahlgüte S690 Potential für das zu entwickelnde Bemessungskonzept, um den unkritischen Beanspruchungszustand Rechnung zu tragen.

5.2.3 Bauteileinfluss

5.2.3 Size effect

Prinzipiell wird der Einfluss durch Bauteileffekte, also der Unterschied der Ermüdungsfestigkeit von unter Laborbedingungen geschweißten Kleinprüfkörpern zu im Werk gefertigten Großbauteilen entsprechend der Realität, durch das Sicherheitskonzept oder die statistische Auswertung berücksichtigt.

In Abbildung 5-16 sind alle vorhandenen Trägerversuchsergebnisse für den unbehandelten Zustand, die im Zusammenhang mit der nachbehandelten Quersteife als Referenzversuche durchgeführt wurden, in Abhängigkeit der Stahlgüte und Spannungsverhältnisse R dargestellt. Auffallend sind die für Trägerversuche verhältnismäßig hohen erreichten Lastspielzahlen. In jedem Fall liegen die Ergebnisse deutlich über der nach DIN EN 1993-1-9 [16] für das Detail

der unbelasteten Quersteife gegebenen Kerbfallklasse 80. Trotz unbehandelter Quersteifennähte liegen alle Versuchsergebnisse oberhalb Kerbfallklasse 90 und die Mehrzahl der Ergebnisse über 112. Selbst die Versuche unter dem Spannungsverhältnis $R = 0,5$, das unter den dargestellten Spannungsverhältnissen das kritischste ist, zeigen Werte, die sogar über Kerbfall 90 bzw. 112 liegen.

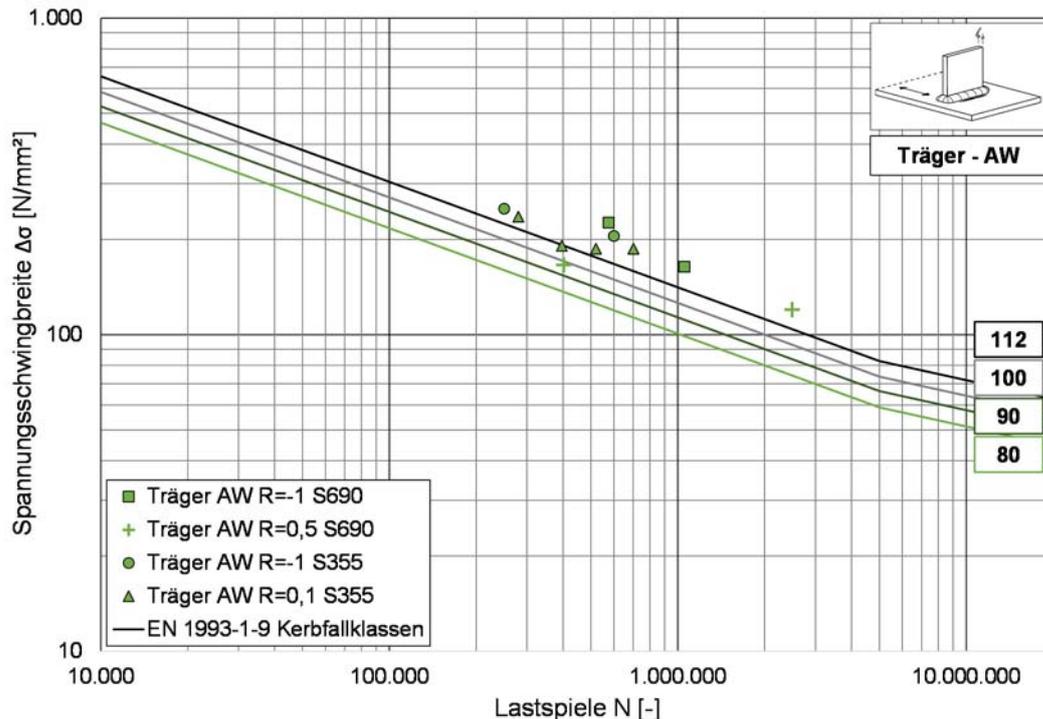


Abbildung 5-16: Einordnung der Trägerversuchsergebnisse im unbehandelten Zustand [3]

Figure 5-16: Categorization of the girder test results in untreated condition [3]

In Abbildung 5-17 sind alle vorhandenen Trägerversuchsergebnisse für den HFH-behandelten Zustand in Abhängigkeit der Stahlgüte und Spannungsverhältnisse R dargestellt. Die rot gefärbten Grenzen gelten für die Stahlgüte S690, die schwarz gefärbten Grenzen für die Stahlgüte S355 der IIV-Empfehlung [68], wobei die durchgezogenen Geraden die Grenzen für die Spannungsverhältnisse $R = 0,1$ und $R = -1,0$ und die gestrichelte Gerade die Grenze unter $R = 0,5$ darstellt. Die HFH-nachbehandelten Trägerversuchsergebnisse verhalten sich ähnlich gutmütig wie die unbehandelten. So dass die nach IIV-Empfehlung [68] gegebene Ermüdungsfestigkeit in nur einem Fall nicht erreicht werden kann. Lediglich ein Trägerversuch aus S690 unter Spannungsverhältnis $R = -1,0$ liegt unterhalb der empfohlenen Kerbkategorie 160 (durchgezogene rote Grenze). Grund dafür ist der Versagensort der Trägerversuche, der sich durch die Verbesserung des Quersteifen-Kerbdetails hin zur Längsnaht bzw. in den Lasteinleitungsbereich verlagert hat, siehe Dürr [30].

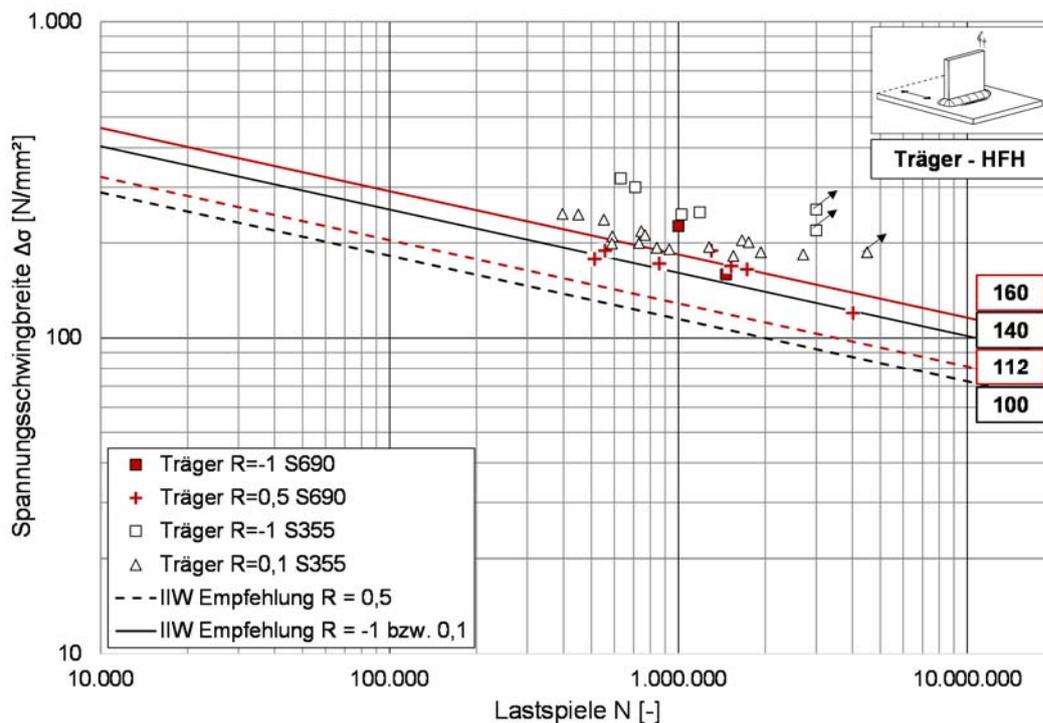


Abbildung 5-17: Einordnung der Trägerversuchsergebnisse im HFH-behandelten Zustand [3]

Figure 5-17: Categorization of the girder test results in HFMI-treated condition [3]

Weiterführende Analysen zur Beurteilung des Bauteileinflusses unbehauelter und HFH-nachbehandelter Quersteifendetails sind in [3] aufbereitet.

5.2.4 Blechdickeneffekt

5.2.4 Plate thickness effect

Der Einfluss geometrischer Parameter auf die Ermüdungsfestigkeit der unbelasteten Quersteife wurde u.a. in Dürr [30] mit Hilfe experimenteller Untersuchungen und numerischer Methoden untersucht. Außerdem stehen aus [80] und [66] Versuche an unterschiedlichen Stahlgüten unter variierender Blechdicke zur Verfügung.

Abbildung 5-18 zeigt die Versuchsdaten anhand der nachbehandelten Proben aus S355. Im Langzeitschwingfestigkeits-Bereich ist kaum ein Unterschied zwischen den beiden Blechdicken $t = 5$ mm und $t = 12$ mm zu erkennen. Eventuell ergibt sich eine erhöhte Lebensdauer im Kurzzeitschwingfestigkeits-Bereich für die dünneren Bleche, das ist jedoch aufgrund der fehlenden Versuchsdaten für $t = 12$ mm nicht zu beweisen. Beide Blechdicken zeigen einen deutlichen Puffer gegenüber der durch die IIW-Empfehlungen [68] gegebenen Festigkeit.

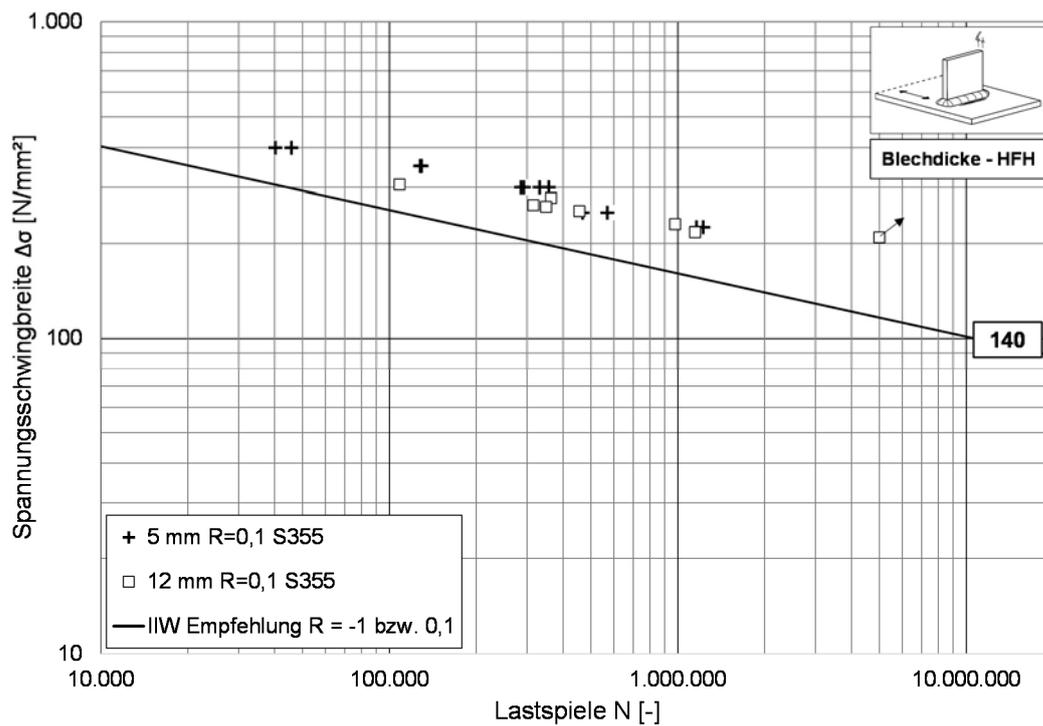


Abbildung 5-18: Einordnung der Versuchsergebnisse im HFH-behandelten Zustand unter Variation der Blechdicke am S355

Figure 5-18: Categorization of the test results in HFMI-treated condition under variation of the plate thickness S355

Abbildung 5-19 zeigt die Ergebnisse unter variierender Blechdicken am Baustahl S460, dem nach IIW-Richtlinie im nachbehandelten Zustand der gleiche Ermüdungswiderstand zugeordnet wird. Hier wird der Unterschied der beiden angewandten Blechdicken deutlicher, wobei die Werte für die Blechdicke $t = 30$ mm erwartungsgemäß den kritischeren Fall darstellen.

Abbildung 5-20 stellt die Versuchsergebnisse mit variierender Blechdicke am S690 dar. Auch hier zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen den Blechdicken $t = 12$ mm und $t = 25$ mm deutlicher sind als zwischen den dünneren Blechen $t = 5$ mm und $t = 12$ mm. Der Puffer gegenüber der Empfehlung nach IIW-Richtlinie [68] verringert sich mit zunehmender Blechdicke.

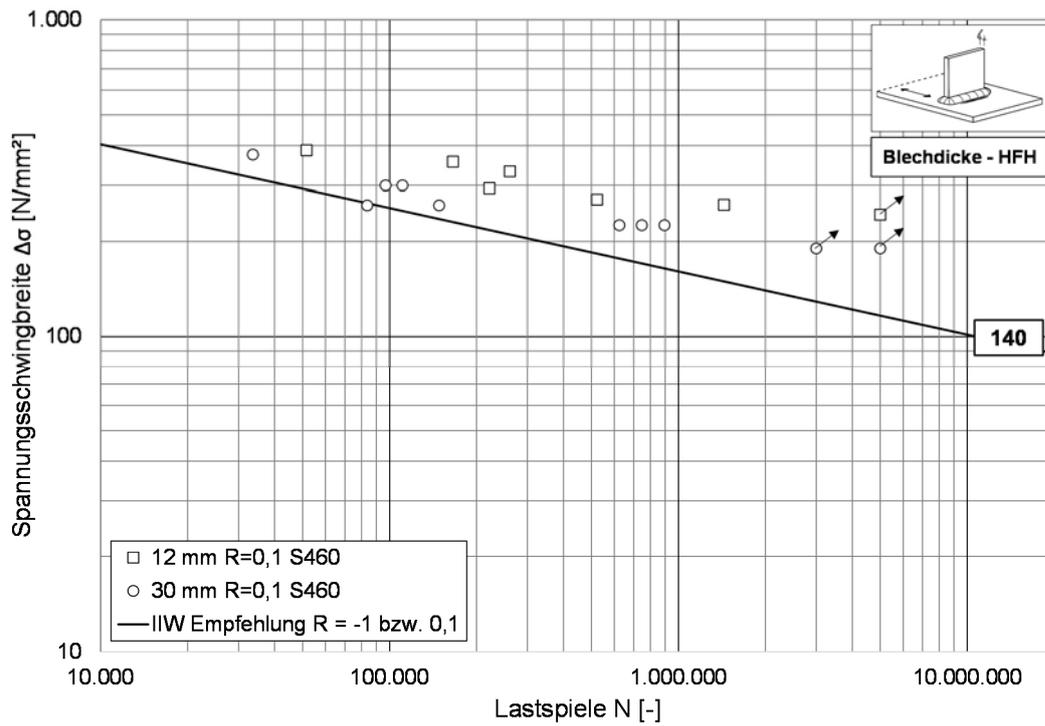


Abbildung 5-19: Einordnung der Versuchsergebnisse im HFH-behandelten Zustand unter Variation der Blechdicke am S460

Figure 5-19: Categorization of the test results in HFMI-treated condition under variation of the plate thickness for S460

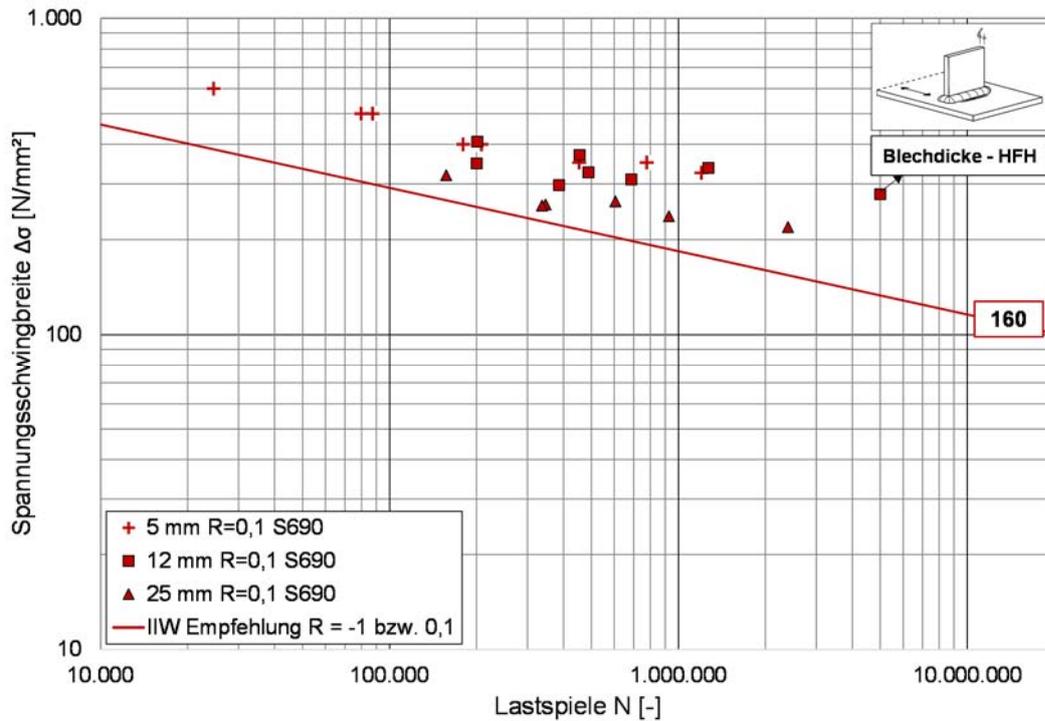


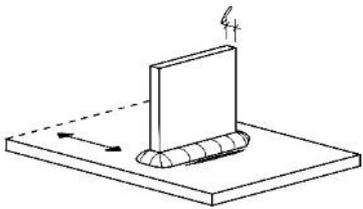
Abbildung 5-20: Einordnung der Versuchsergebnisse im HFH-behandelten Zustand unter Variation der Blechdicke am S690

Figure 5-20: Categorization of the test results in HFMI-treated condition under variation of the plate thickness for S690

In Tabelle 25 sind die Ergebnisse der Auswertung für den Referenzwert der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_c$ bei 2 Mio. Lastwechsel mit fixer und variabler Wöhlerlinienneigung in Abhängigkeit der Blechdicke und Stahlgüte für die Quersteife gegeben. Die Ergebnisse zeigen eine klare Tendenz, dass die Ermüdungsfestigkeit mit steigender Blechdicke abnimmt. Nur in einem Fall (S690 HFH $t = 12$ mm) sticht die berechnete Spannungsschwingbreite aufgrund einer sehr steilen Wöhlerlinienneigung für HFH-nachbehandelte Versuche heraus.

Tabelle 25: Übersicht zur Auswertung des Blechdickeneinflusses der Quersteife

Table 25: Overview of evaluation on transverse stiffener with regard to plate thickness effects

		Bezugswert der Spannungsschwingbreite bei 2×10^6 LW $\Delta\sigma_c$ [N/mm ²] (m) (N_{Versuche}) *Auswertung der vorliegenden Versuchsdaten nach Hintergrunddokument [84] (exkl. DL, BT, TV)					m
		t [mm]					
Stahlgüte nach DIN EN 10025	Nachbehandlung	30	25	16	12	5	
S355	AW				78,7 (3,1)(18)		variabel
	HFH				186,7 (7,2)(11)	189,0 (5,3)(24)	
S460	AW	84,2 (3,2)(8)			77,4 (3,1)(18)		
	HFH	145,0 (6,1)(8)			195,5 (6,2)(11)		
S690	AW		97,2 (4,4)(5)		126,1 (4,1)(17)		
	HFH		179,4 (6,9)(6)		117,3 (2,8)(12)	251,4 (5,9)(8)	
S355	AW				76,4 (3)(18)		fix
	HFH				153,1 (5)(11)	182,6 (5)(24)	
S460	AW	79,7 (3)(8)			76,9 (3)(18)		
	HFH	125,7 (5)(8)			174,6 (5)(11)		
S690	AW		67,7 (3)(5)		92,8 (3)(17)		
	HFH		153,1 (5)(6)		182,7 (5)(12)	225,0 (5)(8)	

Für die Betrachtung der Tendenzen der ausgewerteten Serien, werden im Folgenden die Werte mit fixer Neigung aus Tabelle 25 in Abbildung 5-21 übernommen. Für die Auswertung ist die variable Neigung interessant, jedoch ergibt sich durch die geringe Anzahl an Versuchsergebnisse je Serie und nur eine geringe Anzahl an getesteten Spannungsniveaus, oft ein verfälschtes Bild bei Auswertung mit freier Neigung. Ein weiterer Grund für eine abweichende Wöhlerlinienneigung kann auch durch die Versuchsergebnisse mit Grundmaterialversagen zurückzuführen sein.

Zur besseren Sichtbarkeit wurden entsprechend Trendlinien eingefügt. Die Trendlinien des Blechdickeneffekts liegen für die Quersteife mit unterschiedlicher Stahlgüte relativ parallel zu einander. Demnach ist eine deutliche Tendenz in Abhängigkeit des Blechdickeneinflusses für alle Werkstoffgüten gleichermaßen sichtbar. Trotz der geringen Datenbasis lässt sich erkennen, dass es einen gewissen Blechdickeneffekt gibt. Ob dieser jedoch durch die Erhöhung der Blechdicke des Basisblechs t_b oder durch den vergrößerten Schweißnahtfußpunktstand l verursacht wird, bleibt zu klären.

Diese beeinflussenden Blechdickeneffekte können mittels Kerbspannungsbetrachtungen durch die Finite Elemente Methode untersucht und identifiziert werden, siehe Kapitel 6. Zwar lässt das Kerbspannungskonzept keine Aussage zur Ermüdungsfestigkeit zu, jedoch können Abschätzungen zur Kerbwirkung zuverlässig getroffen werden.

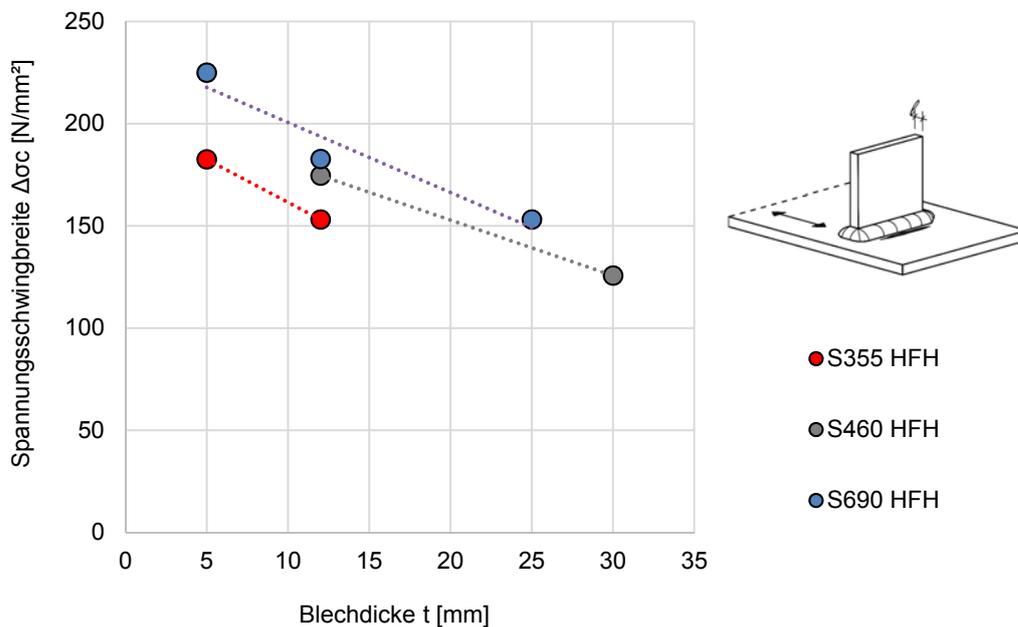


Abbildung 5-21: Blechdickeneinfluss an der HFMI-behandelten Quersteife S355, S460 und S690 unter Auswertung mit fixer Neigung [3]

Figure 5-21: Effect of the plate thickness on HFMI-treated transverse stiffeners S355, S460 and S690 with evaluation with fixed slope [3]

5.3 Stumpfnah – Evaluierung der Bemessungsansätze nach Einflüssen

5.3 Butt weld – Evaluation of design approaches regarding influencing factors

5.3.1 Mittelspannungs- und Streckgrenzeinfluss

5.3.1 Mean stress and yield strength effects

Auch anhand der gesammelten Versuchsergebnisse an unbehandelten und HFH-behandelten querbelasteten Stumpfstoßdetails soll die Empfindlichkeit hinsichtlich der Mittelspannung bestimmt werden. Dazu gibt Tabelle 26 die Übersicht zur Datengrundlage. Es liegen für drei verschiedene Spannungsverhältnisse am S355 und S690 Versuchsdaten vor. Lediglich aus dem Werkstoff S460 existieren nur Zugschwellversuche unter Spannungsverhältnis $R = 0,1$.

Die folgenden SN-Diagramme zeigen in Abhängigkeit des Werkstoffs die in Tabelle 26 aufgelisteten Versuchsergebnisse, getrennt nach deren Nachbehandlungsstatus. Die schwarze Linie deutet zugehörige Wöhlerlinie für die unverschiffene querbelastete Stumpfnah nach DIN EN 1993-1-9 [16] ansetzbare charakteristische Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$ an. Abbildung 5-22 zeigt die Versuchsergebnisse des S355 im unbehandelten Zustand, hierfür liegen jedoch nur zugschwellbelastete Versuchsergebnisse mit dem Spannungsverhältnis $R = 0,1$ vor, weshalb kein Vergleich möglich ist. Jedoch wird anhand Abbildung 5-23 der Ermüdungsfestigkeitsverlust im nachbehandelten Zustand bei hoher Zugschwellbeanspruchung von $R = 0,5$ deutlich.

Tabelle 26: Übersicht über Datengrundlage zum Mittelspannungseinfluss des Stumpfstoßes

Table 26: Overview of data of butt weld with regard to mean stress effects

		Anzahl der vorliegenden Versuchsdaten [-] *(inkl. DL, exkl. TV, nur „nach Schweißvorgang“)		
		R [-]		
Stahlgüte nach DIN EN 10025	Nachbehandlung	-1,0	0,1	0,5
S355	AW	7	55	0
	HFH	16	117	27
S460	AW		8	
	HFH		25	
S690	AW	7	33	9
	HFH	16	79	25
S960	AW		4	
	HFH		12	

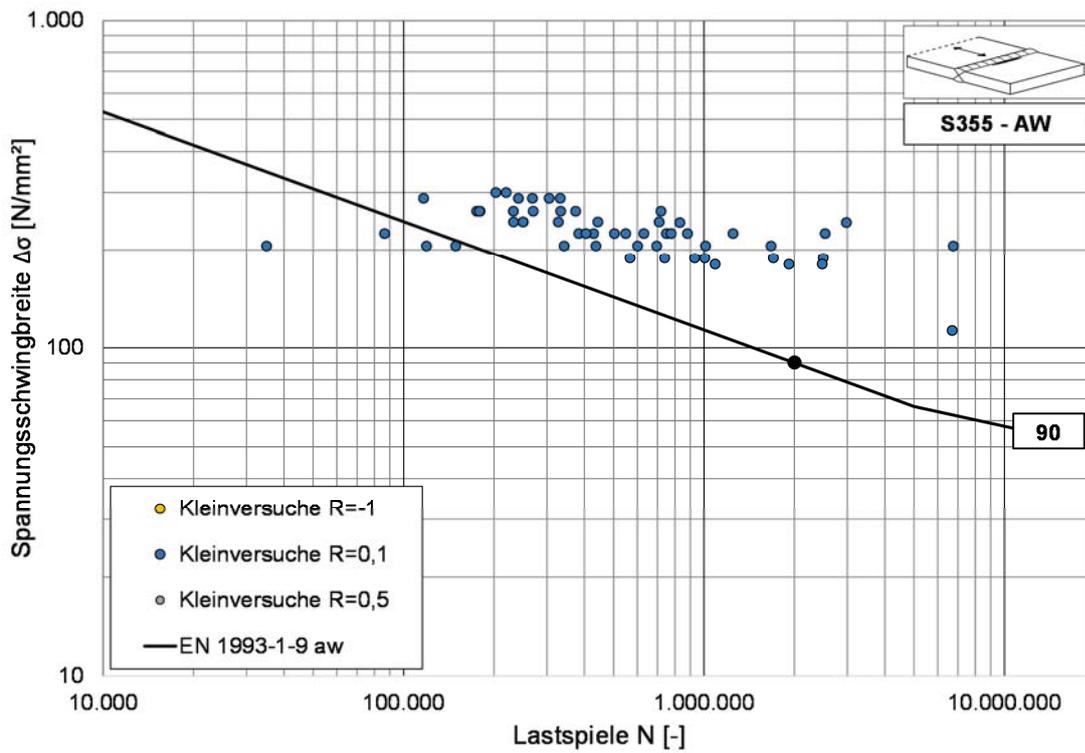


Abbildung 5-22: Mittelspannungseinfluss an unbehandeltem Stumpfstoß am S355

Figure 5-22: Effect of the mean stress on untreated butt joints S355

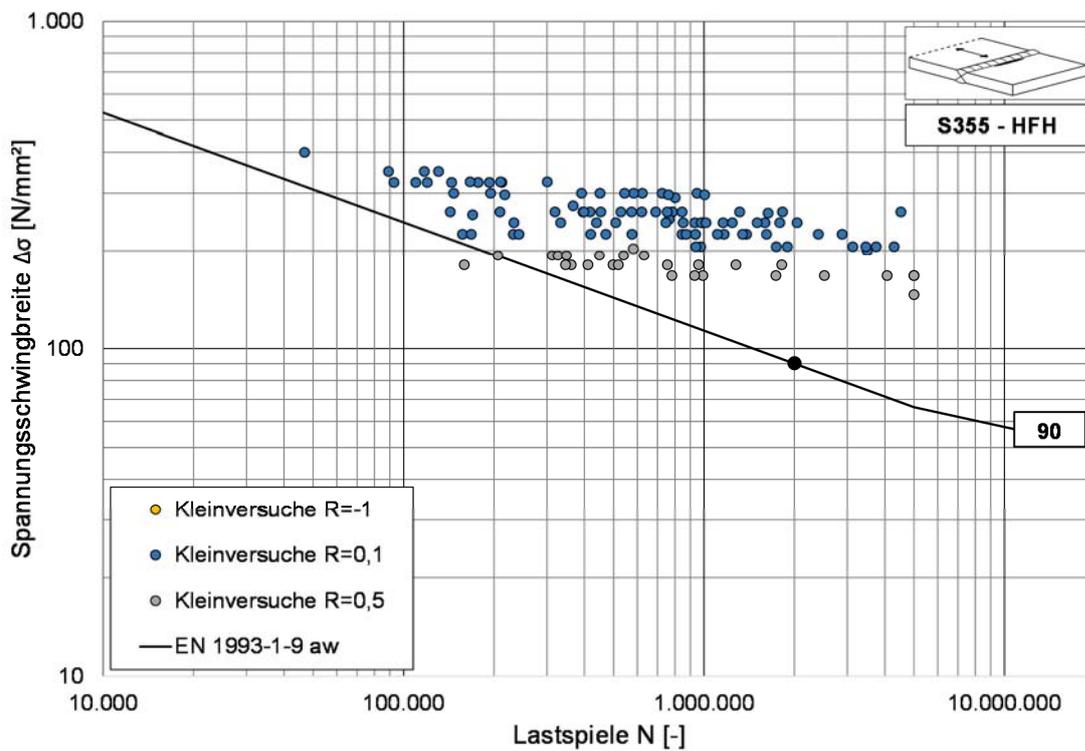


Abbildung 5-23: Mittelspannungseinfluss an HFMI-behandeltem Stumpfstoß am S355

Figure 5-23: Effect of the mean stress on HFMI-treated butt joints S355

Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25 zeigen die Versuchsergebnisse drei verschiedener Spannungsverhältnisse am S690 in Abhängigkeit des Behandlungszustands. Zwar zeigt sich im unbehandelten Zustand eine Lebensdauerverlängerung für wechselbeanspruchte querbelastete Stumpfstoße, jedoch ist der Unterschied der zwei unterschiedlichen Zugschwellbeanspruchungsniveaus $R = 0,1$ und $R = 0,5$ gering. Für den HFH-behandelten Zustand ergibt sich für die Zugschwellbeanspruchungsniveaus eine deutlichere Unterscheidung. Die Streubereiche der einzelnen Serien sind deutlich zu erkennen. Eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit wird dennoch auch im ungünstigen Fall von $R = 0,5$ erreicht.

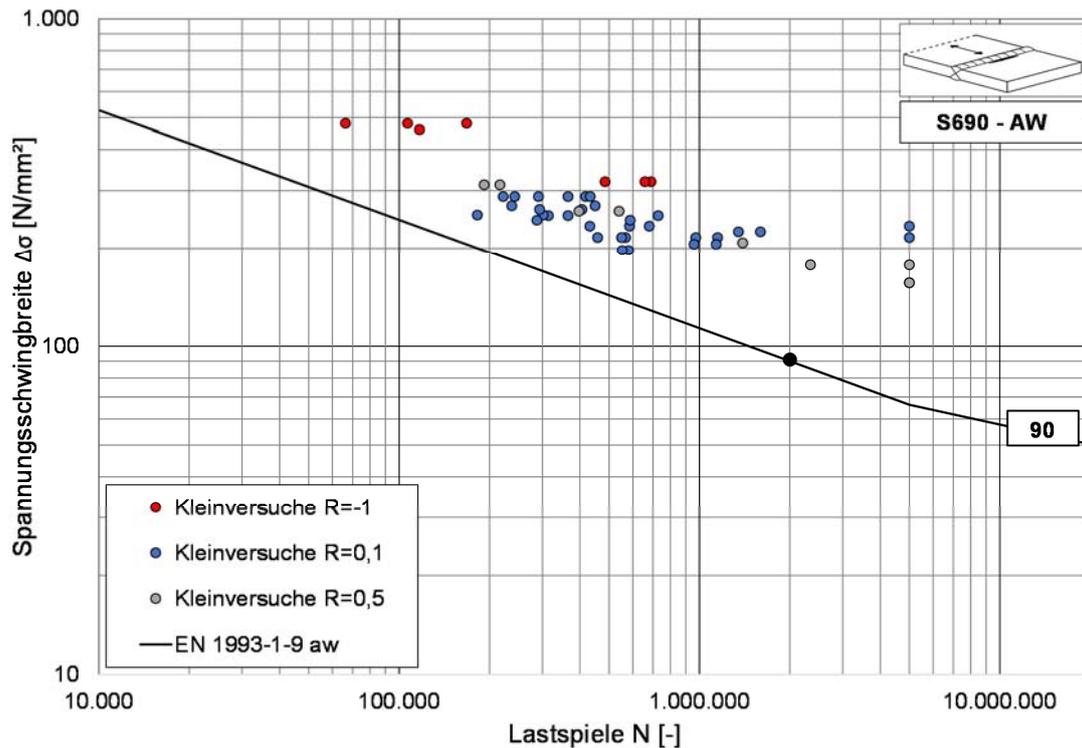


Abbildung 5-24: Mittelspannungseinfluss an unbehandeltem Stumpfstoß am S690

Figure 5-24: Effects of mean stress on untreated butt joints S690

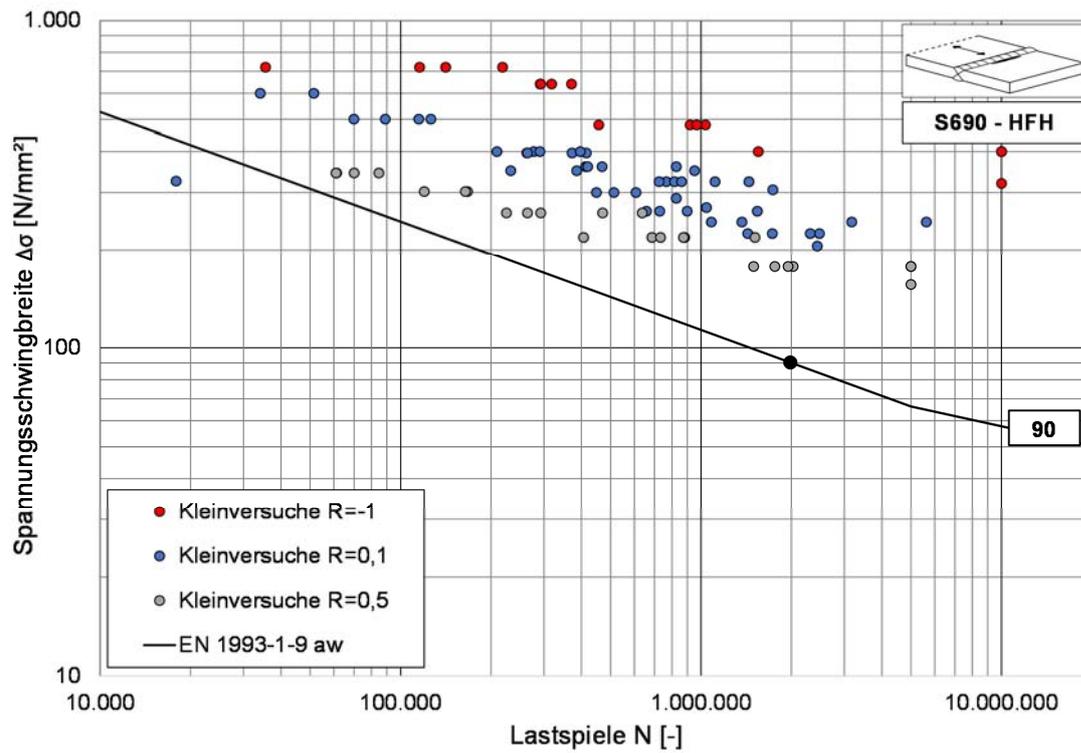


Abbildung 5-25: Mittelspannungseinfluss an HFH-behandeltem Stumpfstoß am S690

Figure 5-25: Effects of mean stress on HFMI-treated butt joints S690

Tabelle 27: Auswertung des Mittelspannungs- und Streckgrenzeinflusses des Stumpfstoßes

Table 27: Evaluation on butt weld with regard to mean stress and yield strength effects

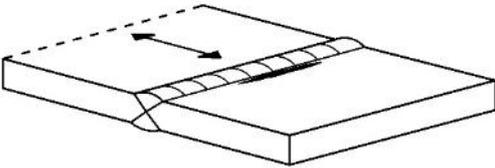
		Bezugswert der Spannungsschwingbreite bei 2×10^6 Mio $\Delta\sigma_c$ [N/mm ²] (m) (N _{Versuche}) * Auswertung der vorliegenden Versuchsdaten nach Hintergrunddokument [84] (exkl. DL, BT, TV)			m
		R [-]			
Stahlgüte nach DIN EN 10025	Nachbehandlung	-1,0	0,1	0,5	
S355	AW		105,6 (3,5) (51)		variabel
	HFH		149,8 (4,5) (92)	138,4 (8,7) (23)	
S460	AW		90,4 (3,2) (8)		
	HFH		184,5 (6,8) (13)		
S690	AW	195,9 (4,3) (7)	114,4 (3,05) (31)	172,3 (4,4) (6)	
	HFH	359,1 (4,4) (9)	168,2 (3,7) (47)	158 (4,9) (22)	
S960	HFH		224,1 (6,9) (11)		
S355	AW		92,9 (3) (51)		fix
	HFH		158,3 (5) (92)	107,6 (5) (23)	
S460	AW		82,0 (3) (8)		
	HFH		145,5 (5) (13)		
S690	AW	122,0 (3) (7)	113,3 (3) (31)	119,2 (3) (6)	
	HFH	385,8 (5) (9)	195 (5) (47)	159,3 (5) (22)	
S960	HFH		166,3 (5) (11)		

Tabelle 27 zeigt die Übersicht über die Auswertung nach Hintergrunddokument, siehe Anhang A der gesammelten Versuchsergebnisse des Stumpfstoßes differenziert nach Auswertung mit fixer und freier Wöhlerlinienneigung und Werkstoffgüte.

Abbildung 5-26 zeigt die Darstellung aus [3] in Form eines Haigh-Diagramms, die Darstellung anhand von Haigh-Diagrammen wurde in [3] gewählt, da diese eine direkte Beurteilung der Mittelspannungsempfindlichkeit zulassen.

Abbildung 5-26 zeigt das Haigh-Diagramm für die ausgewerteten Serien des Stumpfstoßdetails unter variabler Wöhlerlinienneigung aus Tabelle 27. Die Versuchsdaten für die Serien $R = -1,0$ am Stumpfstoß liefern gegenüber den Serien mit Zugschwellbeanspruchung $R = 0,1$ und $R = 0,5$ sehr positive Ergebnisse. Sowohl für den unbehandelten als auch für den behandelten Zustand liegen die Werte weit oberhalb der Ermüdungsfestigkeiten der unter Zugschwellbeanspruchung durchgeführten Versuche. Dies kann jedoch durch mangelnde Versuchsergebnisse lediglich für die Stahlgüte S690 bestätigt werden.

Die unbehandelten Versuche am S355 unter dem Spannungsverhältnis $R = 0,5$ liefern Ergebnisse die ins Auge stechen, diese liegen jedoch in diesem Fall auf der sicheren Seite. Auch für die HFH-behandelten Serien S355 und S690 unter hoher Zugschwellbeanspruchung $R = 0,5$ werden verhältnismäßig hohe Festigkeiten erreicht. Eine deutliche Abminderung der Spannungsamplitude durch eine Zugschwellbeanspruchung unter $R = 0,5$ lässt sich anhand der ausgewerteten Serien nicht nachvollziehen.

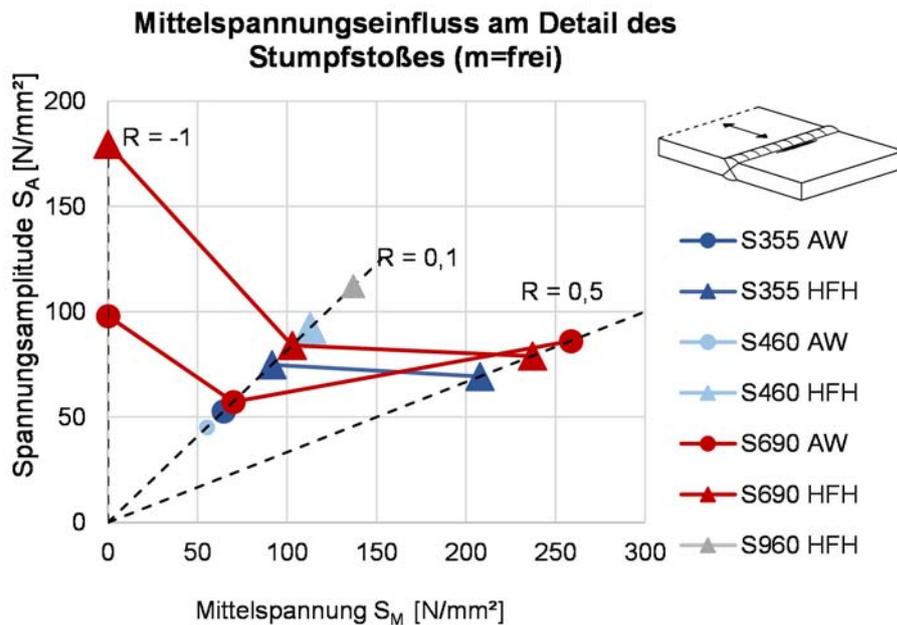


Abbildung 5-26: Mittelspannungseinfluss des Stumpfstoßes ($m = \text{frei}$) [3]

Figure 5-26: Effect of mean stress of butt joints ($m = \text{free}$) [3]

Den Einfluss der variierenden Streckgrenze anhand der einzelnen Versuchsdaten ist in Abbildung 5-27 für den unbehandelten Zustand und Abbildung 5-28 für den HFH-behandelten Zustand des Stumpfstoßes dargestellt. Die einzelnen Versuchsreihen in Abbildung 5-27 sind miteinander verschmiert und geben, erwartungsgemäß keinen Aufschluss über eine zunehmende Lebensdauer bei steigender Streckgrenze.

Im Gegensatz dazu bietet Abbildung 5-28 mit den HFH-nachbehandelten Ermüdungsdaten eine differenziertere Darstellung. Anhand des Wöhlerdiagramm lässt sich ein Einfluss der Streckgrenze auf die Lebensdauer der Versuchsserien erahnen.

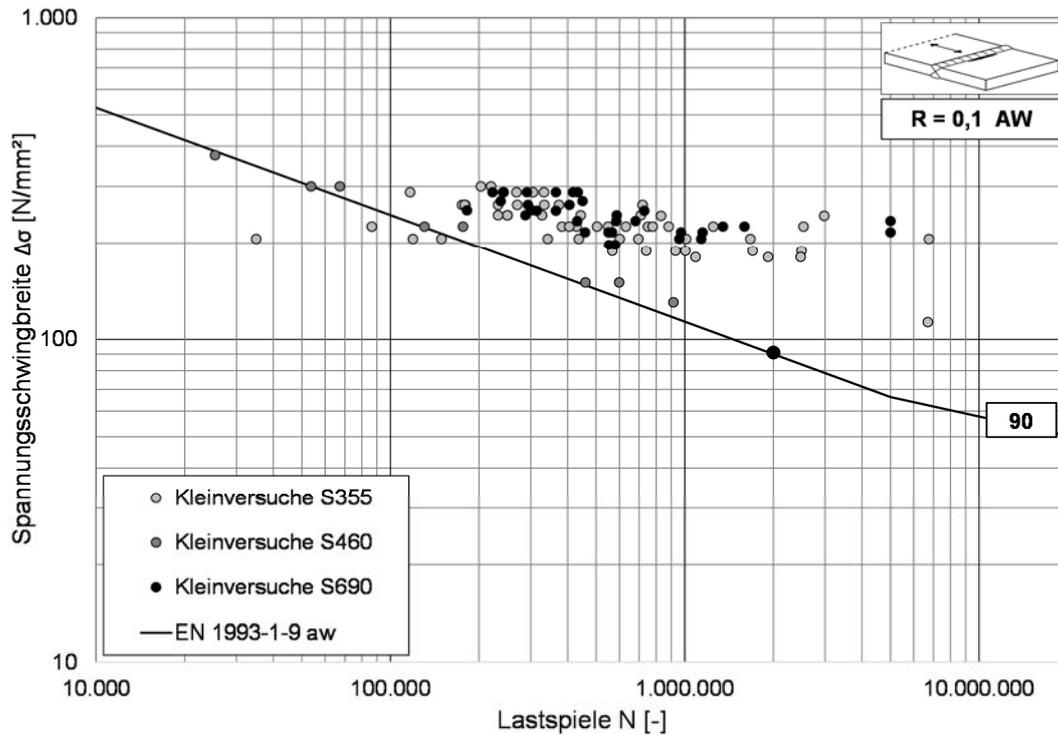


Abbildung 5-27: Streckgrenzeinfluss an unbehandeltem Stumpfstoß unter Spannungsverhältnis $R = 0,1$

Figure 5-27: Yield strength effect for untreated butt weld with stress ratio $R = 0.1$

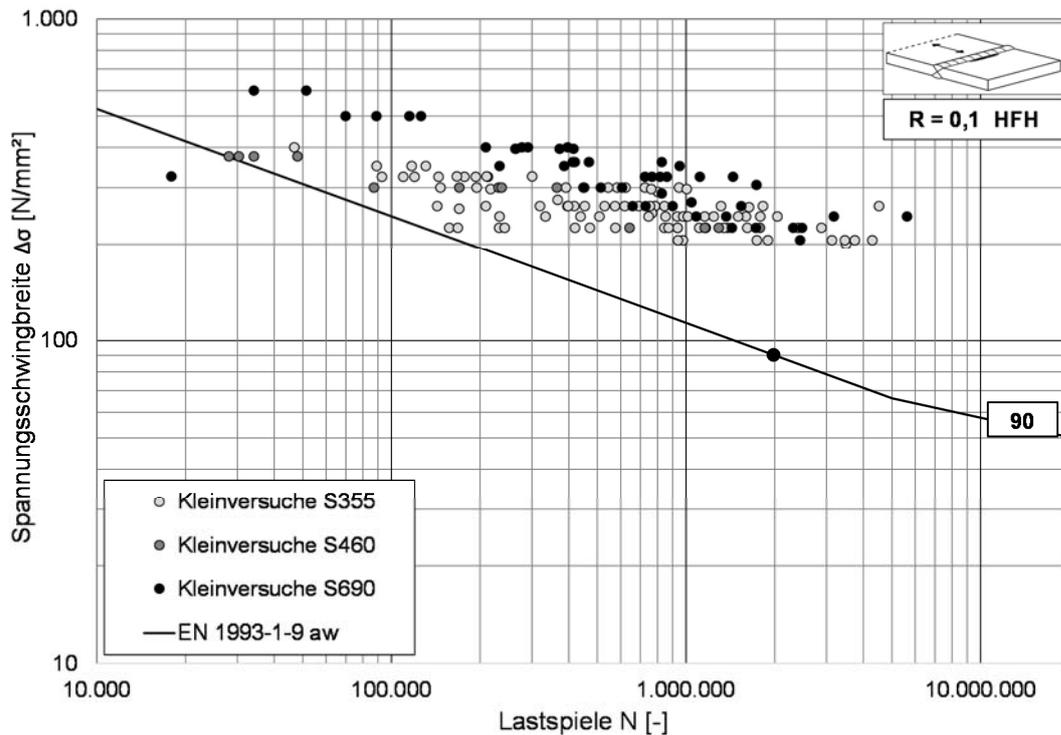


Abbildung 5-28: Streckgrenzeinfluss an HFH-behandelter Stumpfstoß unter Spannungsverhältnis $R = 0,1$

Figure 5-28: Yield strength effect for HFMI-treated butt weld with stress ratio $R = 0.1$

Abbildung 5-29 zeigt die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Versuchsreihen in Abhängigkeit der eingesetzten Streckgrenze und des Behandlungszustands für das Spannungsverhältnis $R = 0,1$, für das die größte Datenmenge vorliegt. Für die HFH-nachbehandelten Serien unter Auswertung einer freien Wöhlerlinienneigung ist ein deutlicher Ermüdungsfestigkeitszuwachs bei wachsender Streckgrenze zu erkennen. Der Zuwachs der unbehandelten Serien erscheint gering.

Die dünne Datenbasis unter Wechselbeanspruchung $R = -1,0$ am Stumpfstoß, lässt nur Aussagen für S690 zu, jedoch kann kein Vergleich zu geringen Streckgrenzen gezogen werden, siehe Abbildung 5-30.

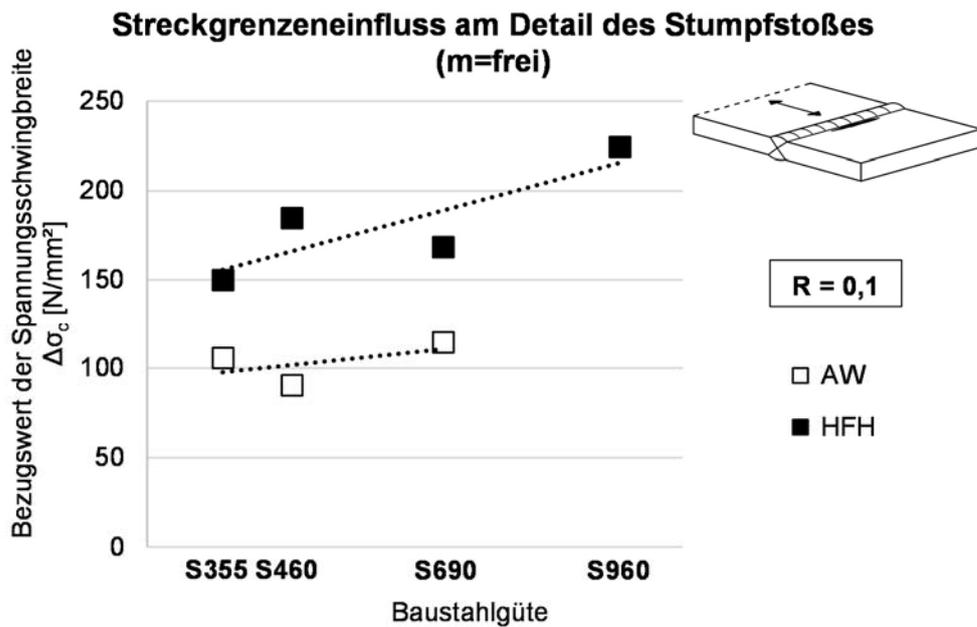


Abbildung 5-29: Streckgrenzeinfluss an unbehandeltem und HFH-behandeltem Stumpfstoß unter Spannungsverhältnis $R = 0,1$ und freier Wöhlerlinienneigung $m_{aw} = m_{HFH} = \text{frei}$ [3]

Figure 5-29: Yield strength effect for untreated and HFMI-treated butt weld with stress ratio $R = 0.1$ and free slope for Wöhler curve $m_{aw} = m_{HFMI} = \text{free}$ [3]

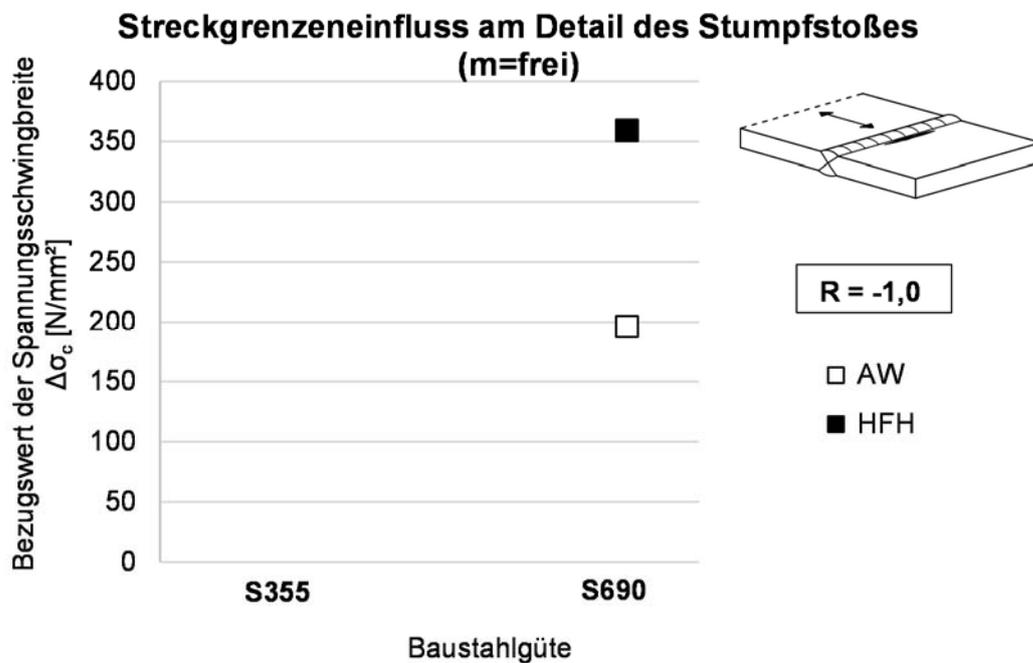


Abbildung 5-30: Streckgrenzeinfluss an unbehandeltem und HFH-behandeltem Stumpfstoß unter Spannungsverhältnis $R = -1,0$ und freier Wöhlerlinienneigung $m_{aw} = m_{HFH} = \text{frei}$ [3]

Figure 5-30: Yield strength effect for untreated and HFMI-treated butt weld with stress ratio $R = -1.0$ and free slope for Wöhler curve $m_{aw} = m_{HFMI} = \text{free}$ [3]

5.3.2 Gegenüberstellung zur IIW-Empfehlung

5.3.2 Comparison to IIW-Recommendation

Abbildung 5-31 zeigt die Gegenüberstellung der ausgewerteten Versuchsdaten aus der Datenbank im Vergleich zu den Widerständen der IIW-Empfehlungen [68] für die Berücksichtigung des Höherfrequenten Hämmerns mit unterschiedlichen Werkstoffgüten. Im Gegensatz zur Darstellung im Haigh-Diagramm mit variabler Neigung wird hier jeweils das Ergebnis der Auswertung mit fixer Wöhlerlinienneigung betrachtet, da auch auf der Widerstandsseite seitens IIW von einer fixen Wöhlerlinienneigung ausgegangen wird.

Die empfohlenen Widerstände [68] zeigen meist eine gute Übereinstimmung mit den ausgewerteten Ergebnissen aus der Datenbank. Lediglich die durch die IIW-Empfehlung [68] angestrebte Ermüdungsfestigkeit von 180 N/mm² kann für den Werkstoff S960 nicht ganz erreicht werden, dies beschränkt sich jedoch nur auf den Fall mit fixer Wöhlerlinienneigung, siehe Tabelle 27 bzw. Abbildung 5-29. Auch für die Serie S460 unter R = 0,1 wird der vorgeschlagene Widerstand der Serie S460 nicht erreicht, aber auch in diesem Fall liegt der Wert unter freier Neigung mit $\Delta\sigma_c = 184,5$ N/mm² über der IIW-Grenze.

Auch bei diesem Konstruktionsdetail steckt noch Potential in der Ausnutzung der positiven Effekte der Wechselbeanspruchung auf die Ermüdungsfestigkeit durch HFH-Anwendung.

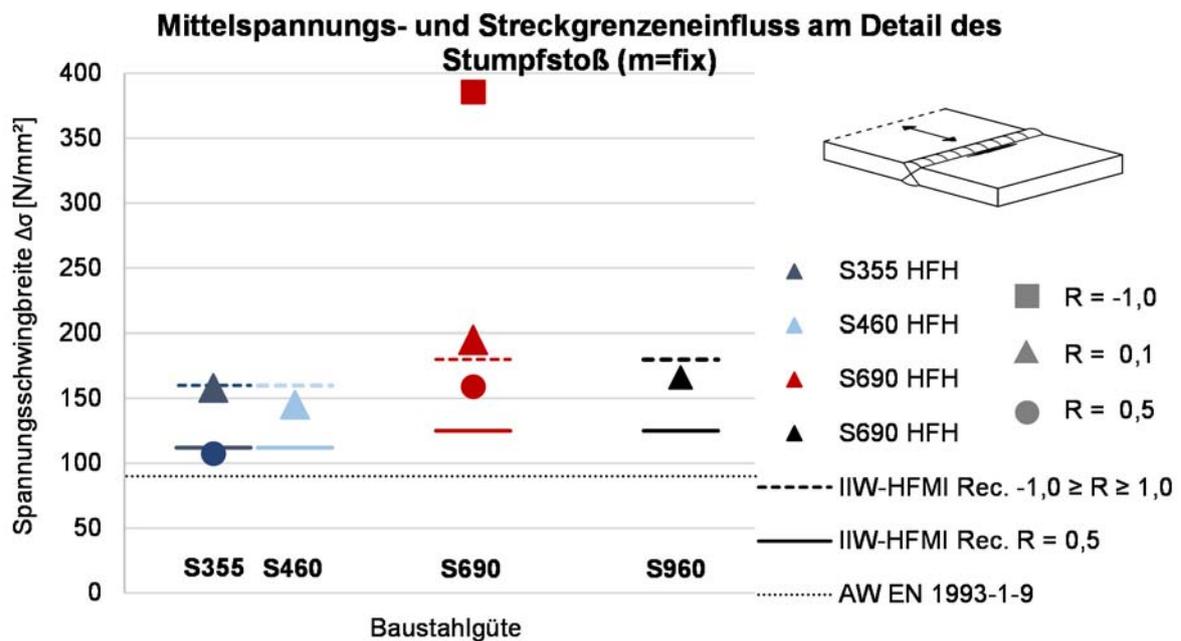


Abbildung 5-31: Streckgrenzen- und Mittelspannungseinfluss anhand der Gegenüberstellung zu den Ermüdungsfestigkeiten der IIW-Empfehlungen am HFH-nachbehandelten Stumpfstoß ($m_{HFH} = \text{fix}$) [3]

Figure 5-31: Yields strength- and mean stress influence in comparison to proposed detail categories of IIW-Recommendations for HFMI-treated butt weld ($m_{HFMI} = \text{fix}$) [3]

5.3.3 Bauteileffekt

5.3.3 Size effect

Zur Beurteilung des Bauteileffekts des querbelasteten Stumpfstoßes standen keine Trägerversuche bzw. Bauteilversuche zur Verfügung, weshalb an dieser Stelle kein Vergleich hinsichtlich fertigungstechnischer Einflussparameter möglich ist.

5.3.4 Blechdickeneffekt

5.3.4 Plate thickness effect

Gemäß DIN EN 1993-1-9 [16] muss für den Stumpfstoß im unbehandelten Zustand prinzipiell ab einer Blechdicke von $t > 25$ mm ein festigkeitsabmindernder Einfluss für den Ermüdungsnachweis berücksichtigt werden, siehe Kapitel 3.4.2.

Abbildung 5-32 zeigt den Blechdickeneinfluss zunächst für den unbehandelten Stumpfstoß am S355. Auffallend sind einige Versuchsdaten der Serie $t = 16$ mm die unterhalb der Wöhlerlinie des Kerbfalls 90 für den Stumpfstoß liegen. Die Ergebnisse der Serie $t = 12$ mm liegen hauptsächlich im oberen Bereich der Versuchswolke, zur Serie $t = 5$ mm liegen keine unbehandelten Versuchsdaten vor.

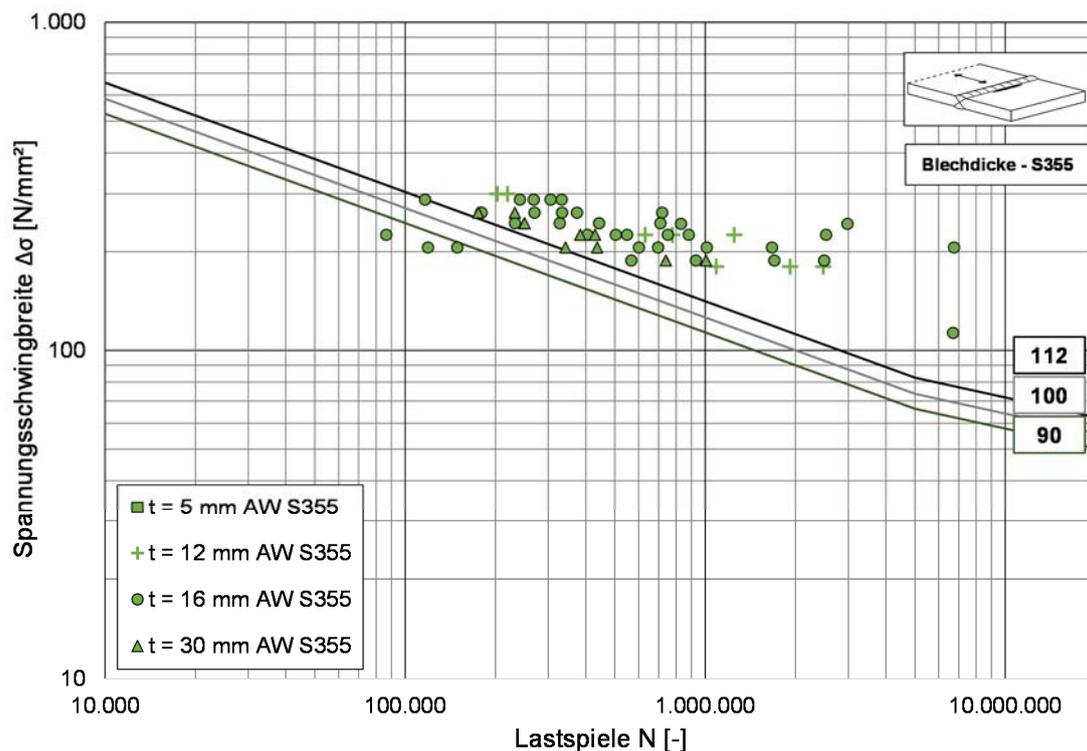


Abbildung 5-32: Blechdickeneinfluss an unbehandeltem Stumpfstoß aus S355

Figure 5-32: Plate thickness effect of as-welded butt weld of S355

Die Ergebnisse der HFH-nachbehandelten Versuchsserien sind in Abbildung 5-33 in Abhängigkeit der Blechdicken für die Stahlgüte S355 dargestellt. Wie bei der Ergebnisdarstellung der unbehandelten Versuche, scheinen einzelne Probekörper der HFH-nachbehandelten Serie mit

$t = 16$ mm ungewöhnlich geringe Lebensdauern erreicht zu haben. Die Datenpunkte der Serien $t = 12$ mm und $t = 5$ mm liegen im oberen Bereich aller Versuchsdaten.

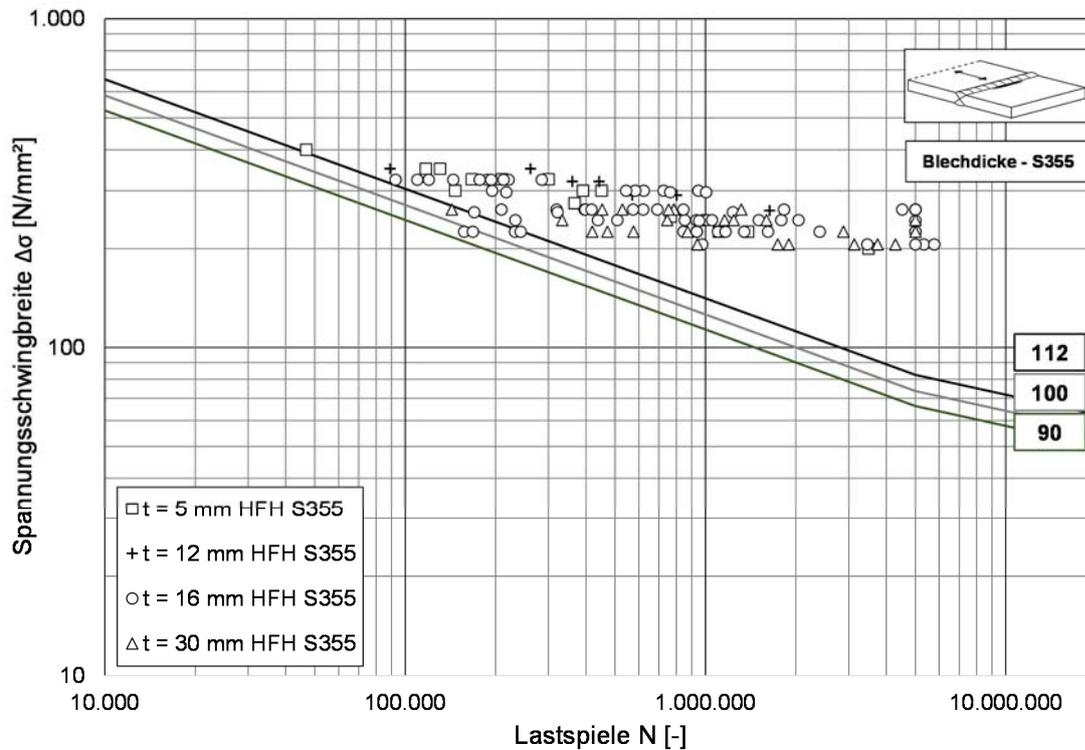


Abbildung 5-33: Blechdickeneinfluss am HFH-behandelten Stumpfstoß aus S355

Figure 5-33: Plate thickness effect of HFMI-treated butt weld of S355

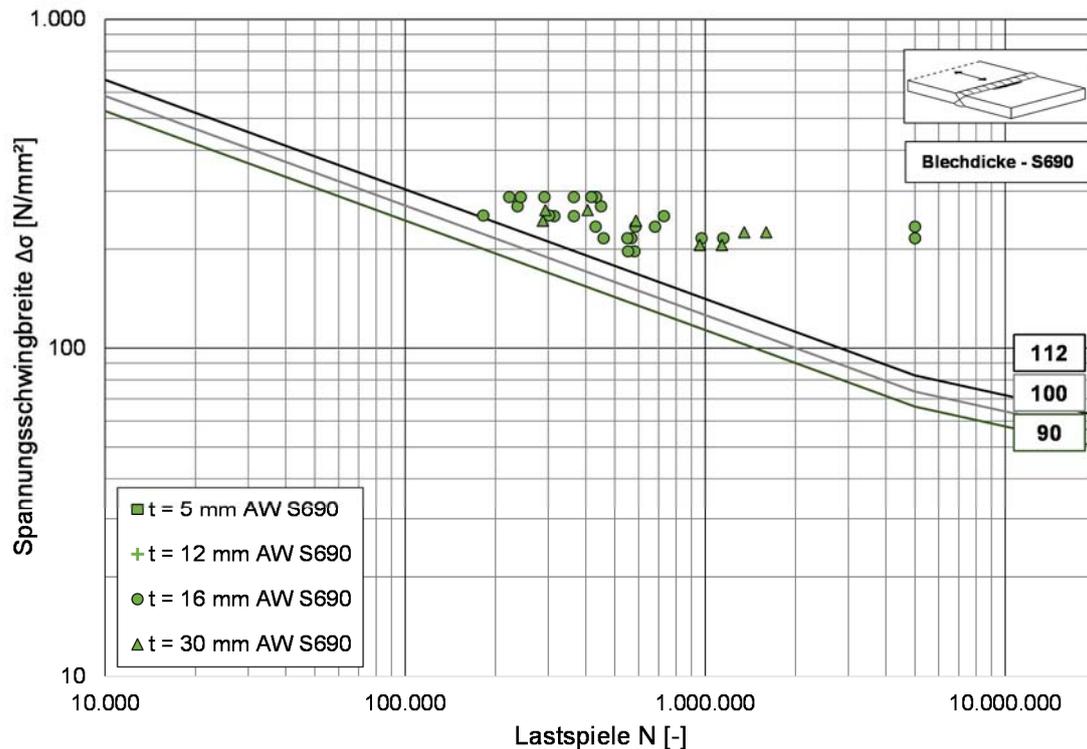


Abbildung 5-34: Blechdickeneinfluss an unbehandeltem Stumpfstoß aus S690

Figure 5-34: Plate thickness effect on untreated butt joint of S690

Für die Stahlgüte S690 sind die unbehandelten und behandelten Versuchsdaten in Abhängigkeit der Blechdicken in Abbildung 5-34 und Abbildung 5-35 aufgezeigt. Durch die geringe Datengrundlage im unbehandelten Zustand, können nur für die Serien $t = 16$ mm und $t = 30$ mm Aussagen getroffen werden. Es erweckt den Anschein, als sei die Streubreite der Versuche mit Blechdicken $t = 16$ mm wesentlich größer als bei den Versuchen mit $t = 30$ mm.

Auch im behandelten Zustand erkennt man für die Serie mit Blechdicken $t = 16$ mm eine relativ große Streubreite der Ergebnisse. Die einzelnen Datenpunkte der Blechdicke $t = 5$ mm deuten zunächst auf eine geringere Festigkeit hin, als die der größeren Blechdicken, das mag der Sensibilität der geringen Blechdicken gegenüber Biegeeffekten bei der Versuchsdurchführung geschuldet sein. Ein weiterer Grund ist die geringe Anzahl an Versuchen für die Serie $t = 5$ mm im höheren Lastwechselbereich.

Für die Serie mit Blechdicke $t = 30$ mm bestätigt sich der Effekt, dass eine größere Blechdicke zu einer geringeren Lebensdauer führt.

In Tabelle 28 sind die ausgewerteten Serien in Abhängigkeit der Blechdicke und Stahlgüte mit freier und vorgegebener Wöhlerlinienneigung tabelliert.

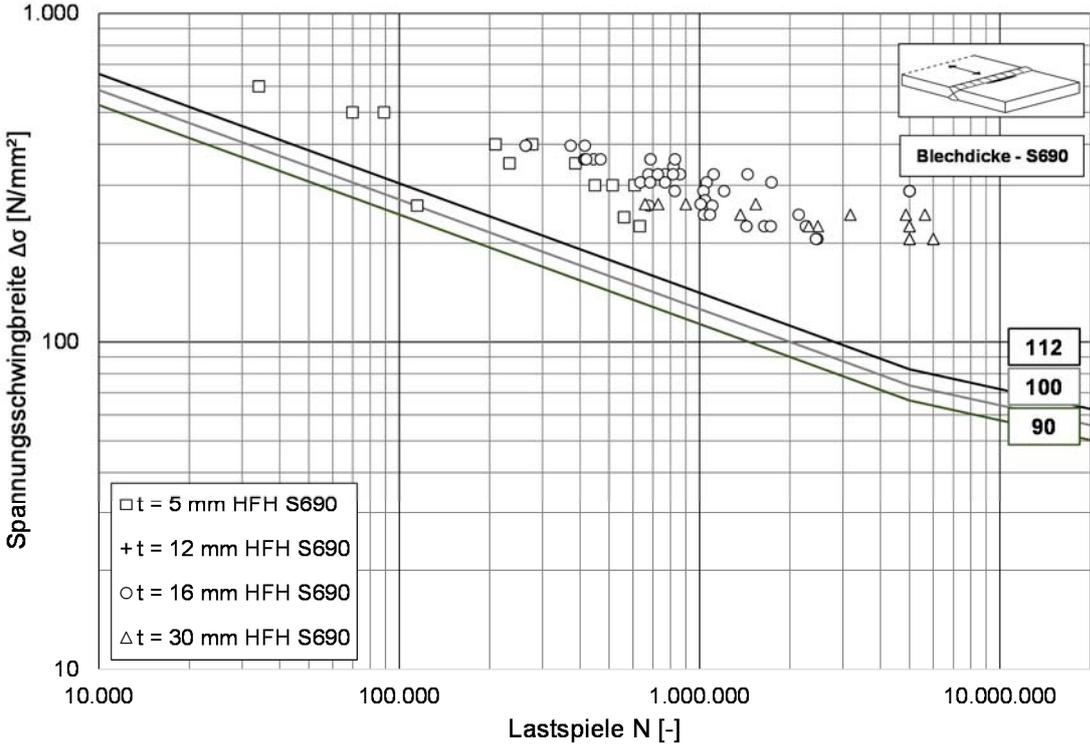


Abbildung 5-35: Blechdickeneinfluss am HFH-behandelten Stumpfstoß aus S690

Figure 5-35: Plate thickness effect on HFMI-treated butt joint of S690

Tabelle 28: Übersicht zur Auswertung des Blechdickeneinflusses des Stumpfstoßes

Table 28: Overview of evaluation for butt weld with regard to plate thickness effects

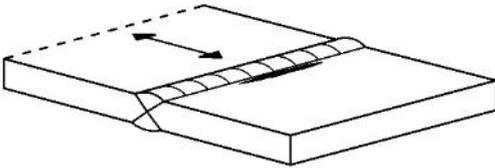
		Bezugswert der Spannungsschwingbreite bei $2M_{io} \Delta\sigma_c$ [N/mm ²] (m) (N _{Versuche}) * Auswertung der vorliegenden Versuchsdaten nach Hintergrunddokument [84] (exkl. DL, BT, TV)				m
		t [mm]				
Stahlgüte nach DIN EN 10025	Nachbehandlung	30	16	12	5	
S355	AW	125,6 (4,0)/(10)	85,1 (3,1)/(33)	147,4 (4,1)/(8)		variabel
	HFH	159,3 (5,1)/(23)	118,1 (3,5)/(52)	209,9 (6,7)/(8)	188,8 (5,6)/(14)	
S460	AW	90,4 (3,3)/(8)				
	HFH	198,9 (7,5)/(7)				
S690	AW	156,8 (5,6)/(8)	85,2 (2,3)/(23)			
	HFH	207,8 (7,6)/(10)	176,4 (2,6)/(41)		185,0 (3,8)/(10)	
S355	AW	97,7 (3,0)/(10)	83,8 (3,0)/(33)	121,2 (3,0)/(8)		fix
	HFH	158,9 (5,0)/(23)	150,2 (5,0)/(52)	179,5 (5,0)/(8)	178,9 (5,0)/(14)	
S460	AW	82 (3)/(8)				
	HFH	139,5 (5)/(7)				
S690	AW	94,8 (3,0)/(8)	111,7 (3,0)/(23)			
	HFH	191,6 (5,0)/(10)	210,3 (5,0)/(41)		210,4 (5,0)/(10)	

Abbildung 5-36 zeigt den Blechdickeneffekt in Abhängigkeit der jeweils nominellen Stahlgüte für den querbelasteten Stumpfstoß unter Annahme einer fixen Wöhlerlinienneigung. Durch die Auswertung mit freier Wöhlerlinienneigung der einzelnen Serien ergaben sich für unterschiedliche Stahlgüten widersprüchliche, bzw. gegenläufige Blechdickeneffekte. Wie bereits beschrieben kann die Ursache in den unterschiedlich geprüften Lastwechsel-Bereichen liegen, was zu einer Verfälschung der freien Neigung führen kann, siehe Tabelle 28 (S690 t = 5 mm

m = 3,8). Dagegen wurde die Serie t = 30 mm vorwiegend im Bereich hoher Lastwechselzahlen geprüft, was zu einer sehr flachen Neigung führen kann, siehe Tabelle 28 (S690 und t = 30 mm: m = 7,6). Deshalb wird für die Betrachtung des Blechdickeneffekts in Abbildung 5-36 die Serienauswertung unter fixer Wöhlerlinienneigung von m = 5 genutzt.

Ein abfallender Ermüdungswiderstand kann mit zunehmender Blechdicke erkannt werden, er fällt jedoch weniger ausgeprägt aus als am Detail der Quersteife, vgl. Abbildung 5-21. So gibt es am Detail des Stumpfstoßes Ausreißer für die Blechdicke t = 12 mm und t = 16 mm innerhalb des Trends. Die Parallelität der Trendlinie der HFH-nachbehandelten Ergebnisse zur Geraden des nach DIN EN 1993-1-9 vorgegebenen Blechdickeneffekts ab 25 mm lässt darauf schließen, dass die Berücksichtigung des Blechdickeneffekts gleichermaßen auf unbehandelte und HFH-behandelte Stumpfstoße zutrifft und angewandt werden sollte.

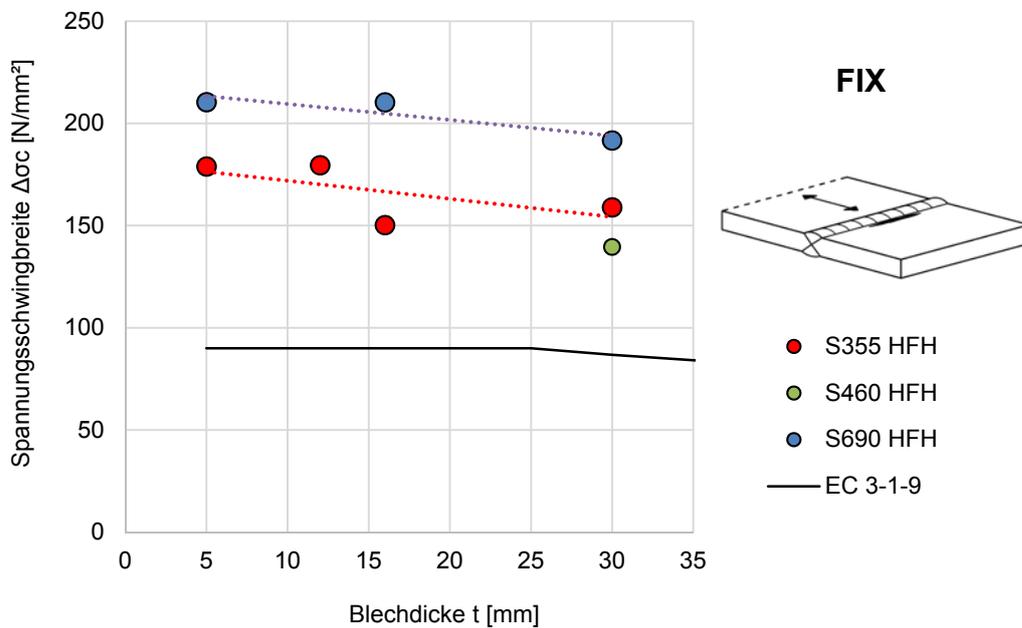


Abbildung 5-36: Blechdickeneinfluss am HFH-behandelten Stumpfstoß aus S355 und S690 unter Auswertung mit fixer Neigung [3]

Figure 5-36: Plate thickness effect on HFMI-treated butt joint of S355 and S690 with evaluation with fixed slope [3]

5.4 Längssteife – Evaluierung der Bemessungsansätze nach Einflüssen

5.4 Longitudinal attachment – Evaluation of design approaches regarding influencing factors

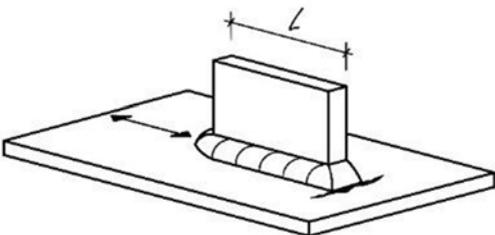
5.4.1 Mittelspannungs- und Streckgrenzeinfluss

5.4.1 Mean stress and yield strength effects

Tabelle 29 zeigt die Datengrundlage zur Beurteilung des Mittelspannungseinflusses der Längssteife. Es wird deutlich, dass am Beispiel der Längssteife die geringste Datenmenge zur Verfügung steht und nicht alle betrachteten Spannungsverhältnisse abgedeckt sind. Um jedoch eine Auswertung vornehmen zu können, wurden die Versuchsdaten der Werkstoffe S690 und S700 aufgrund der geringen Abweichung der Streckgrenze voneinander gemeinsam ausgewertet.

Tabelle 29: Übersicht über Datengrundlage zum Mittelspannungseinfluss der Längssteife

Table 29: Overview of data of longitudinal attachment with regard to mean stress effects

		Anzahl der vorliegenden Versuchsdaten [-] *(inkl. DL, ohne Großbauteilversuche, nur „nach Schweißvorgang“)		
		R [-]		
Stahlgüte nach DIN EN 10025	Nachbehandlung	-1,0	0,1	0,5
S355	AW		25	
	HFH		63	
S690	AW		27	0
	HFH		75	8
S700	AW	6	5	
	HFH	6	6	

Aufgrund der Übersichtlichkeit der vorliegenden Daten werden die Versuchsergebnisse in nur zwei Diagrammen veranschaulicht. Abbildung 5-37 zeigt die vorliegenden einzelnen Versuchsergebnisse der HFH- und unbehandelten Längssteife am Werkstoff S355 im Vergleich zur nach DIN EN 1993-1-9 ansetzbaren charakteristischen Ermüdungsfestigkeit der Längssteife mit $l > 100$ mm von $\Delta\sigma_c = 56$ N/mm². Abbildung 5-38 zeigt die einzelnen Ergebnisse am S690.

Anhand Abbildung 5-38 fällt auf, dass die Ergebnisse für die unbehandelten, wechselbeanspruchten Ergebnisse für S690 im unteren Streubereich der unter zugschwellbeanspruchten erzielten Ergebnisse liegen. Das ist untypisch. Bei den behandelten Versuchsdaten liegen die wechselbeanspruchten Versuchsdaten erwartungsgemäß im oberen Streubereich der zugschwellbeanspruchten nachbehandelten Versuche.

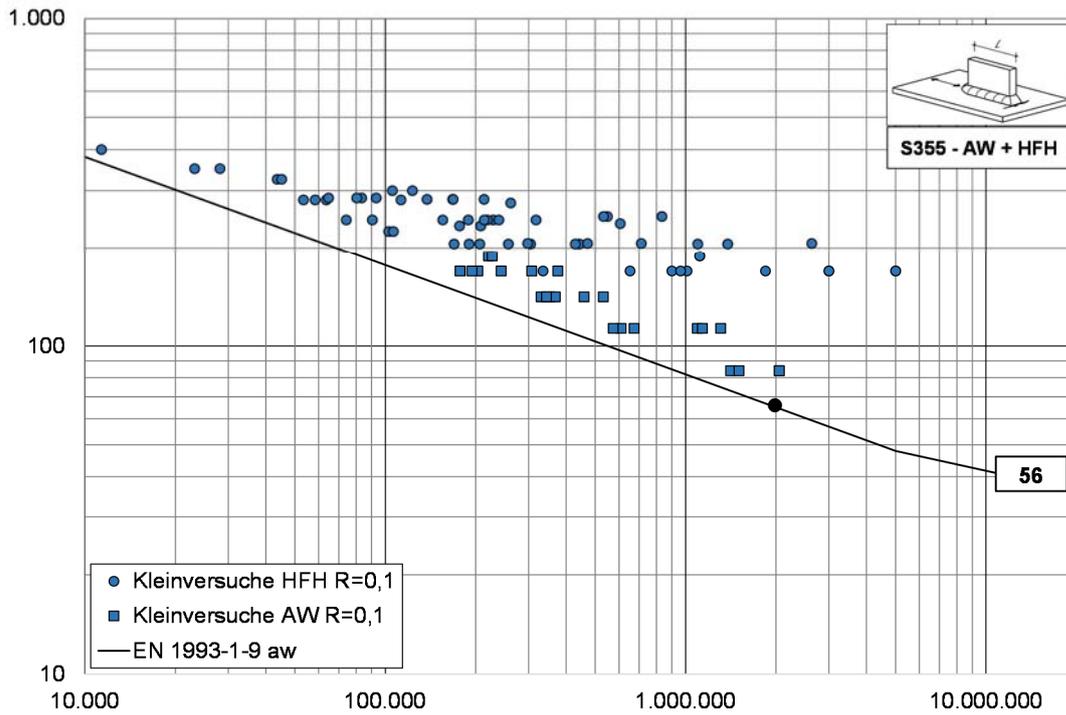


Abbildung 5-37: Mittelspannungseinfluss an HFH- und unbehandelter Längssteife am S355

Figure 5-37: Mean stress effect on HFMI- and untreated longitudinal stiffener of S355

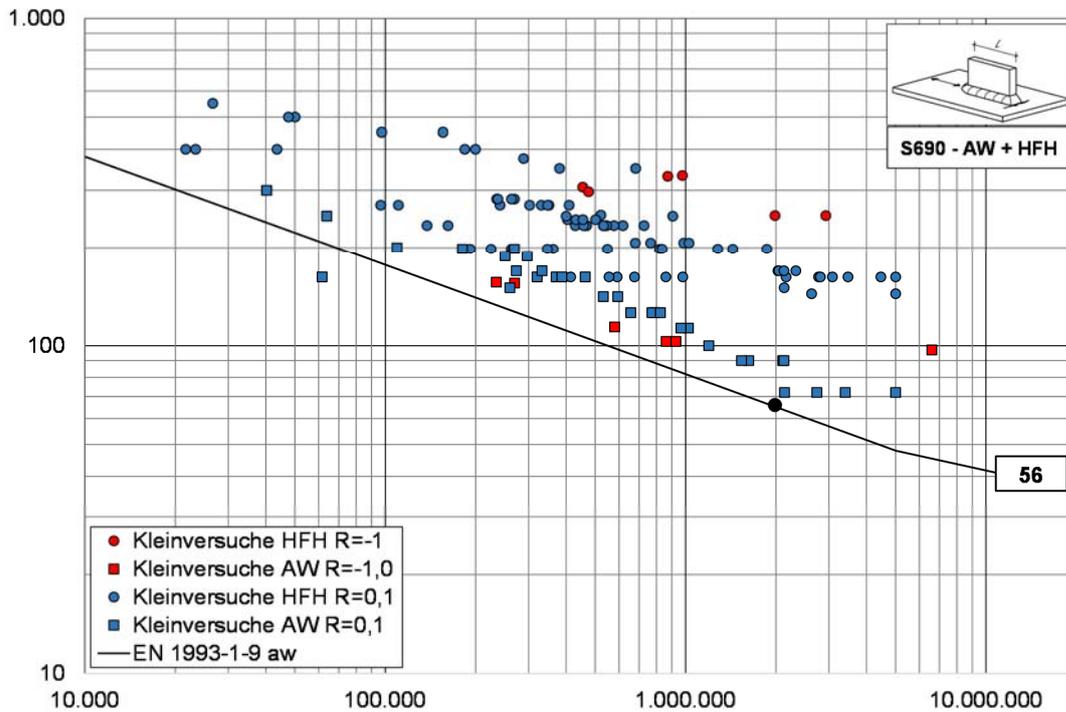
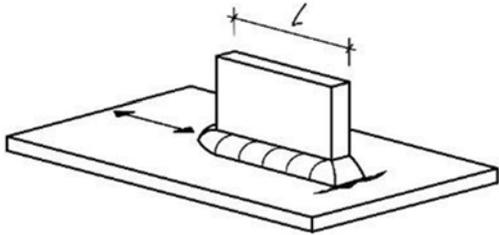


Abbildung 5-38: Mittelspannungseinfluss an HFH- und unbehandelter Längssteife am S690

Figure 5-38: Mean stress effect on HFMI- and untreated longitudinal stiffener of S690

Tabelle 30: Auswertung des Mittelspannungs- und Streckgrenzeinflusses der Längssteife

Table 30: Evaluation on longitudinal attachment with regard to mean stress and yield strength effect

		Bezugswert der Spannungsschwingbreite bei 2×10^6 LW $\Delta\sigma_c$ [N/mm²] (m) (N _{Versuche})			m
		R [-]			
Stahlgüte nach DIN EN 10025	Nachbehandlung	-1,0	0,1	0,5	
S355	AW		65 (2,7) (23)		variabel
	HFH		114,9 * (4,6) (57)		
S690/S700	AW	65,0 (4,7) (6)	67,9 (2,9) (31)		variabel
	HFH	171,5*** (4,2) (6)	132,3 ** (3,2) (56)	81,7 (4,6) (8)	
S355	AW		69,5 (3) (23)		fix
	HFH		121,6 * (5) (57)		
S690/S700	AW	44,9 (3) (6)	69,1 (3) (31)		fix
	HFH	197,6*** (5) (6)	148,8 ** (5) (56)	89,9 (5) (8)	

*Anteil Wurzelversagen: 0%

**Anteil Wurzelversagen: ca. 46%

***Anteil Wurzelversagen: ca. 33%, Anteil GM-Versagen: ca. 33%

Die Serie L2_S690_HFH mit breiterem Prüfquerschnitt aus [90] wurde bei der Auswertung in Tabelle 30 nicht berücksichtigt. Aufgrund eines sehr flachen Nahtanstiegswinkels (ca. 15°) dieser Längssteifennähte, führte die Versuchsdurchführung aller Probekörper zu verfrühtem Wurzelversagen. Infolge des flachen Anstiegswinkels, war die ursprüngliche Nahtdicke der Referenzserien nicht mehr gegeben, weshalb ein verfrühtes Wurzelversagen auftrat. [90]

Zwar führten die HFH-behandelten Proben aus S690 zu jeder Menge Wurzelversagen, da diese jedoch im zu erwartenden Bereich für Wurzelversagen lagen (zwischen 150 N/mm² und 160 N/mm²), sind diese Versuchsdaten in die Auswertung mit eingeflossen. Ein als kritisch bewertetes Wurzelversagen der Längssteife ist somit für die S690 Serien in gewisser Weise in der statistischen Auswertung berücksichtigt. Der Anteil der Versuchsproben mit Wurzelversagen ist in Tabelle 30 gegeben.

Die Auswertung zeigt, dass die Verlagerung des Risswachstums vom Nahtübergang der Längssteife an die Nahtwurzel dennoch zu einer wesentlichen Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit führt.

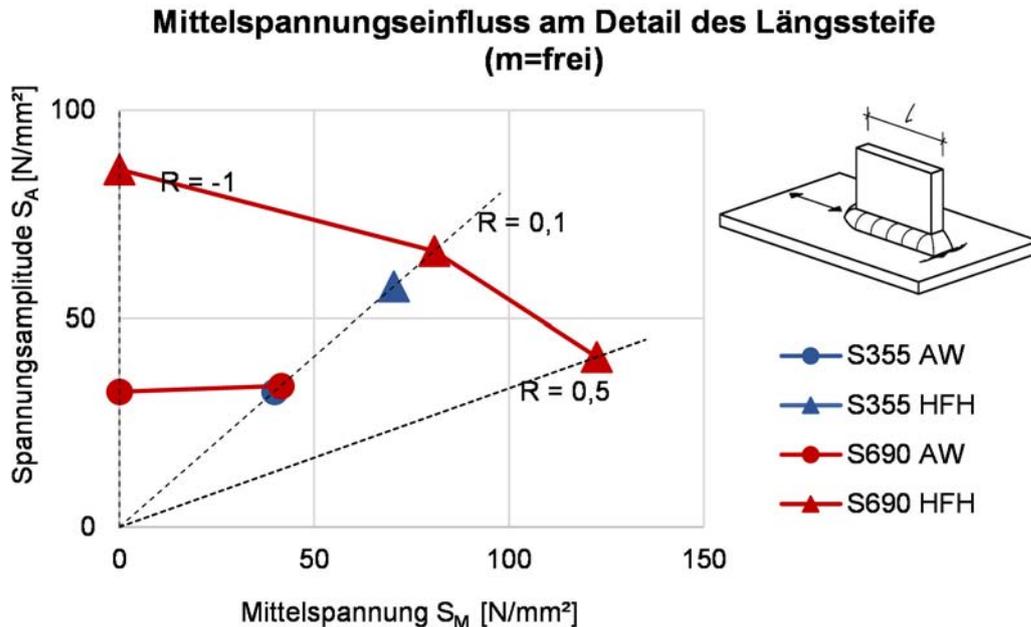


Abbildung 5-39: Mittelspannungseinfluss der Längssteife (m = var) [3]

Figure 5-39: Mean stress effect of the longitudinal stiffener (m = var) [3]

Abbildung 5-39 zeigt die Darstellung aus [3] in Form eines Haigh-Diagramms, die Darstellung anhand von Haigh-Diagrammen wurde in [3] gewählt, da diese eine direkte Beurteilung der Mittelspannungsempfindlichkeit zulassen.

Im Haigh Diagramm (Abbildung 5-39) sind die mit variabler Wöhlerlinienneigung ausgewerteten Serien aus Tabelle 29 bzw. Tabelle 30 einzeln aufgetragen. Die positive Beeinflussung einer Wechselbeanspruchung kann anhand des in Abbildung 5-39 dargestellten Haigh-Diagramms am Konstruktionsdetail der Längssteife für den HFH-behandelten Zustand bestätigt werden. Auch die hohe Zugschwellbeanspruchung von $R = 0,5$ zeigt im HFH-behandelten Zustand ein ermüdungsfestigkeitsabminderndes, also typisches Verhalten.

Jedoch kann dieser Mittelspannungseinfluss für die im Schweißzustand belassenen Prüfkörper nicht erkannt werden.

Abbildung 5-40 und Abbildung 5-41 zeigen die einzelnen Versuchsdaten für den unbehandelten und HFH-behandelten Zustand in Abhängigkeit der Streckgrenze für die Längssteife. Anhand der Versuchsergebnisse des unbehandelten Zustands wird die Stahlgütenunabhängigkeit deutlich, wogegen beim HFH-behandelten Zustand die Anwendung der Stahlgüte S690 deutlichere Verbesserungen hervorruft.

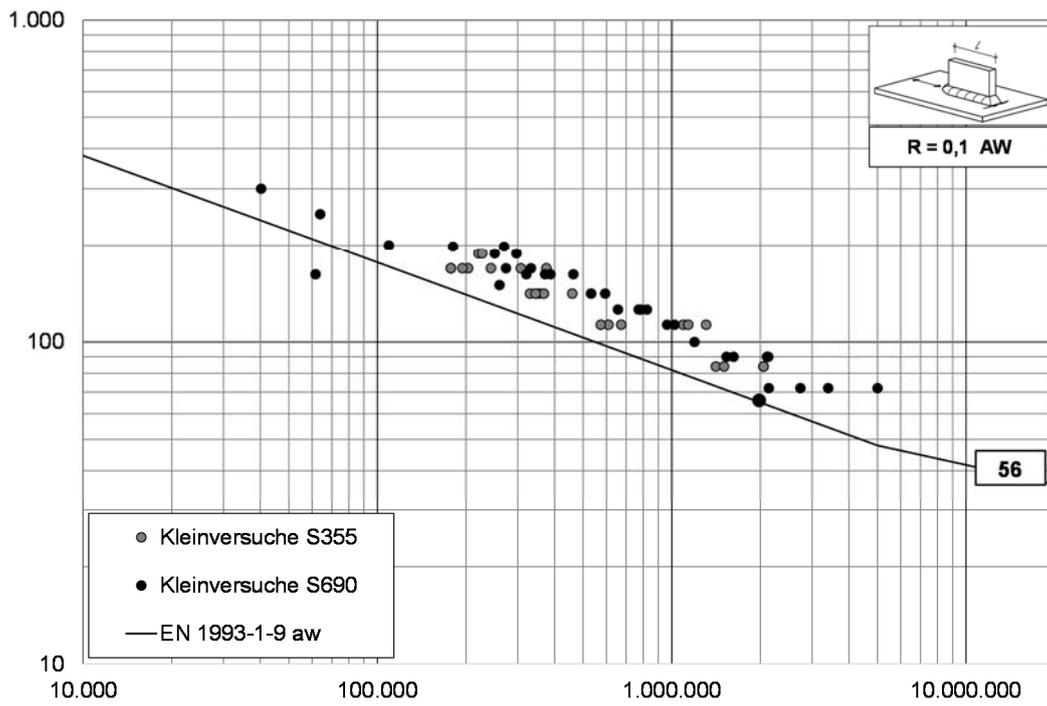


Abbildung 5-40: Streckgrenzeinfluss an unbehandelter Längssteife unter Spannungsverhältnis $R = 0,1$

Figure 5-40: Effect of yield strength on untreated longitudinal stiffener with stress ratio $R = 0,1$

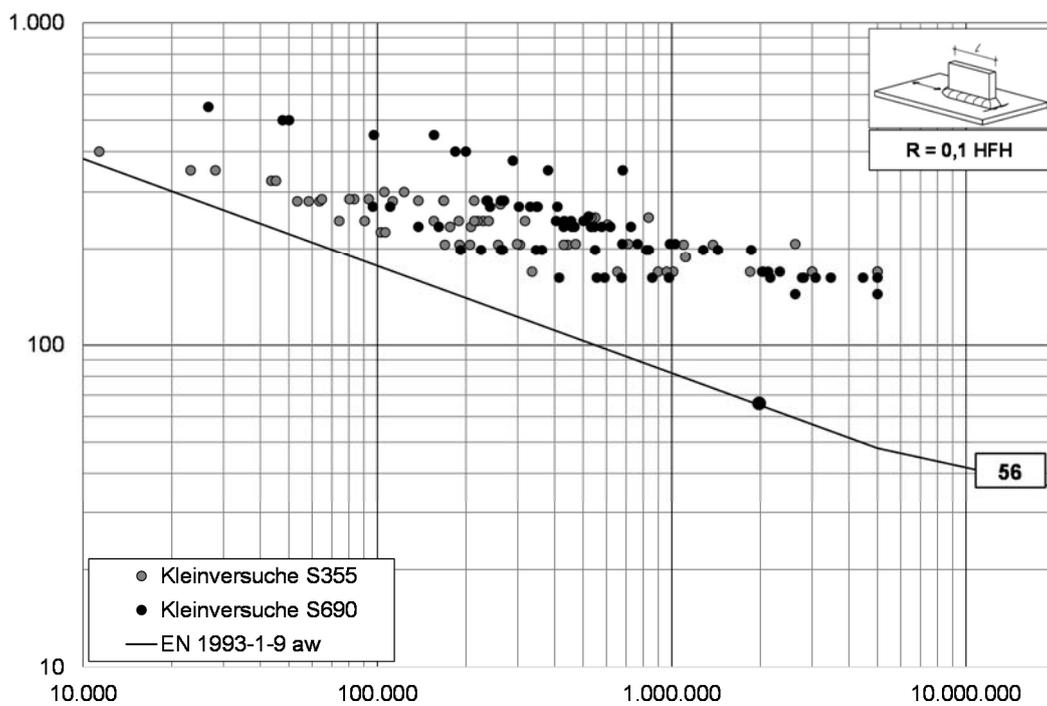


Abbildung 5-41: Streckgrenzeinfluss an HFH-behandelter Längssteife unter Spannungsverhältnis $R = 0,1$

Figure 5-41: Effect of the yield strength on HFMI-treated longitudinal stiffener with stress ratio $R = 0,1$

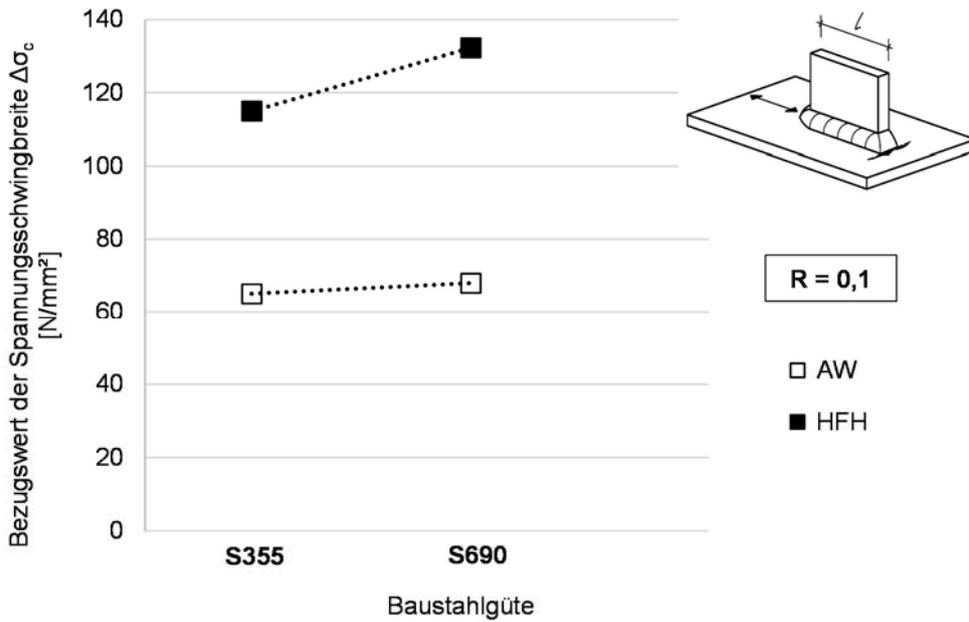


Abbildung 5-42: Streckgrenzeinfluss an unbehandelter und HFH-behandelter Längssteife unter Spannungsverhältnis $R = 0,1$ und freier Wöhlerlinienneigung $m_{aw} = m_{HFH} = \text{frei}$ [3]

Figure 5-42: Effect of the yield strength on untreated and HFMI-treated longitudinal stiffener with stress ratio $R = 0.1$ and free slope of the Wöhler curve $m_{aw} = m_{HFMI} = \text{free}$ [3]

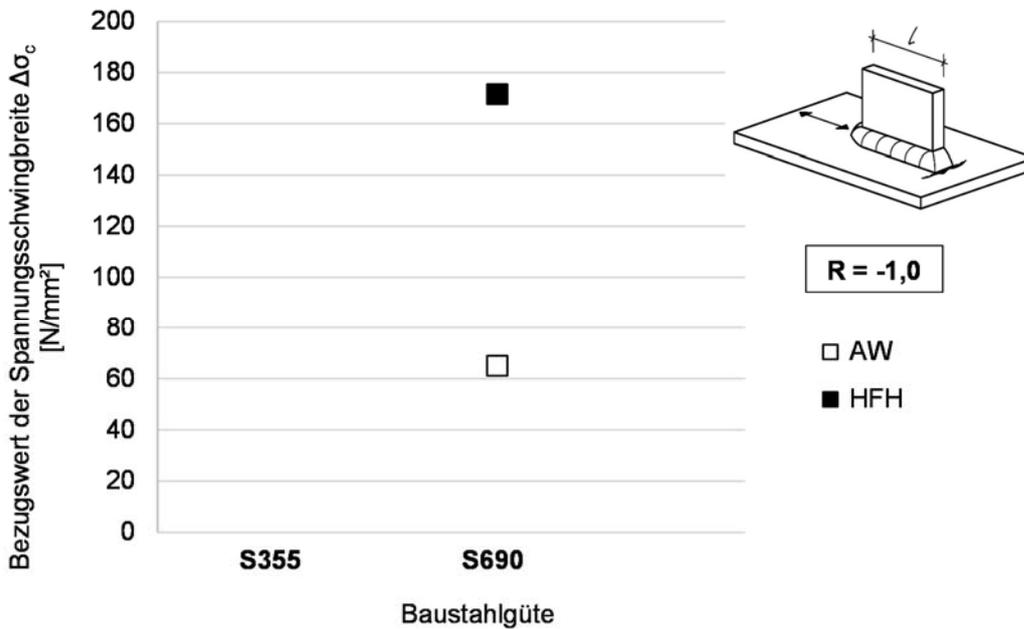


Abbildung 5-43: Streckgrenzeinfluss an unbehandelter und HFH-behandelter Längssteife unter Spannungsverhältnis $R = -1,0$ und freier Wöhlerlinienneigung $m_{aw} = m_{HFH} = \text{frei}$ [3]

Figure 5-43: Effect of the yield strength on untreated and HFMI-treated longitudinal stiffener with stress ratio $R = -1.0$ and free slope of the Wöhler curve $m_{aw} = \text{und } m_{HFMI} = \text{free}$ [3]

Abbildung 5-44 zeigt die empfohlenen Bemessungswerte des IIW zur Berücksichtigung des Höherfrequenten Hämmerns bei der Ermüdungsbemessung der Längssteife in Abhängigkeit der Streckgrenze und des Spannungsverhältnisses. Es kann eine gute Übereinstimmung mit den Werten der ausgewerteten Serien aus Tabelle 30 bestätigt werden. Lediglich dem begünstigenden Effekt durch die Wechselbeanspruchung wurde, wie auch bei den beiden vorhergehend betrachteten Details, keine Rechnung getragen. Hier ergibt sich wiederum Potential für den Vorschlag der DAST-Richtlinie.

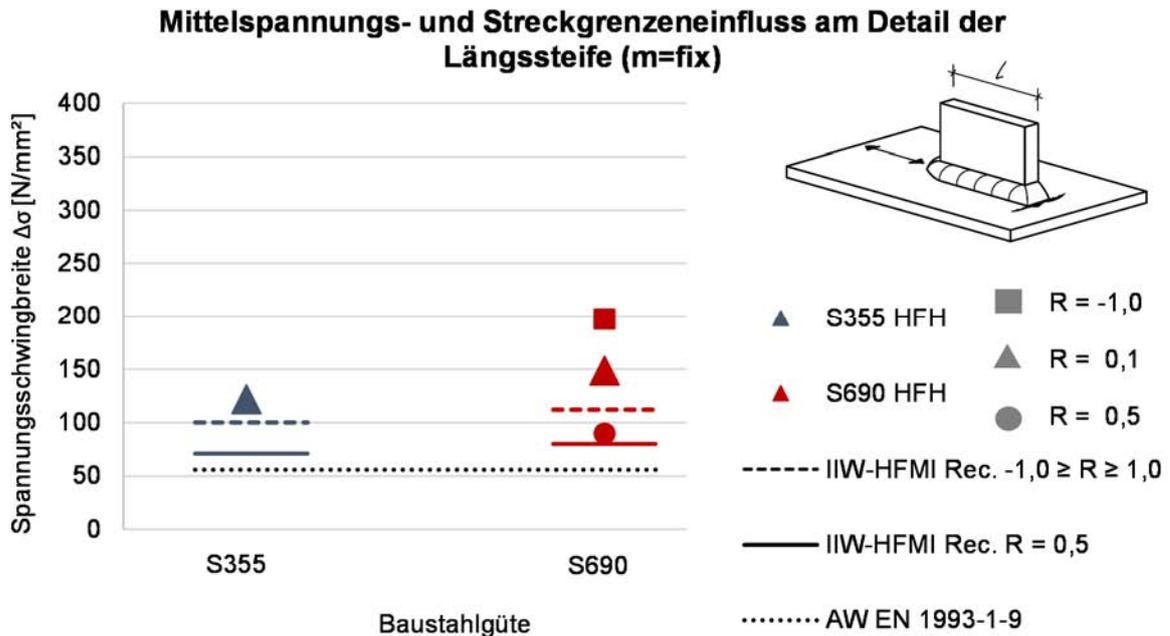


Abbildung 5-44: Gegenüberstellung Streckgrenzen- und Mittelspannungseinfluss an HFH-behandelter Längssteife unter fixer Wöhlerlinienneigung $m_{HFH} = frei$ [3]

Figure 5-44: Comparison of yield strength- and mean stress effects for HFMI-treated longitudinal stiffener with fixed slope of Wöhler curve $m_{HFMI} = free$ [3]

5.4.2 Blechdickeneffekt

5.4.2 Plate thickness effect

Die Abbildung 5-45 und Abbildung 5-46 zeigen die einzelnen Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Blechdicke für die Stahlgüten S355 und S690 in HFH-behandeltem Zustand im Vergleich zu den Kerbfallklassen 56 – 80 N/mm² aus DIN EN 1993-1-9 [16].

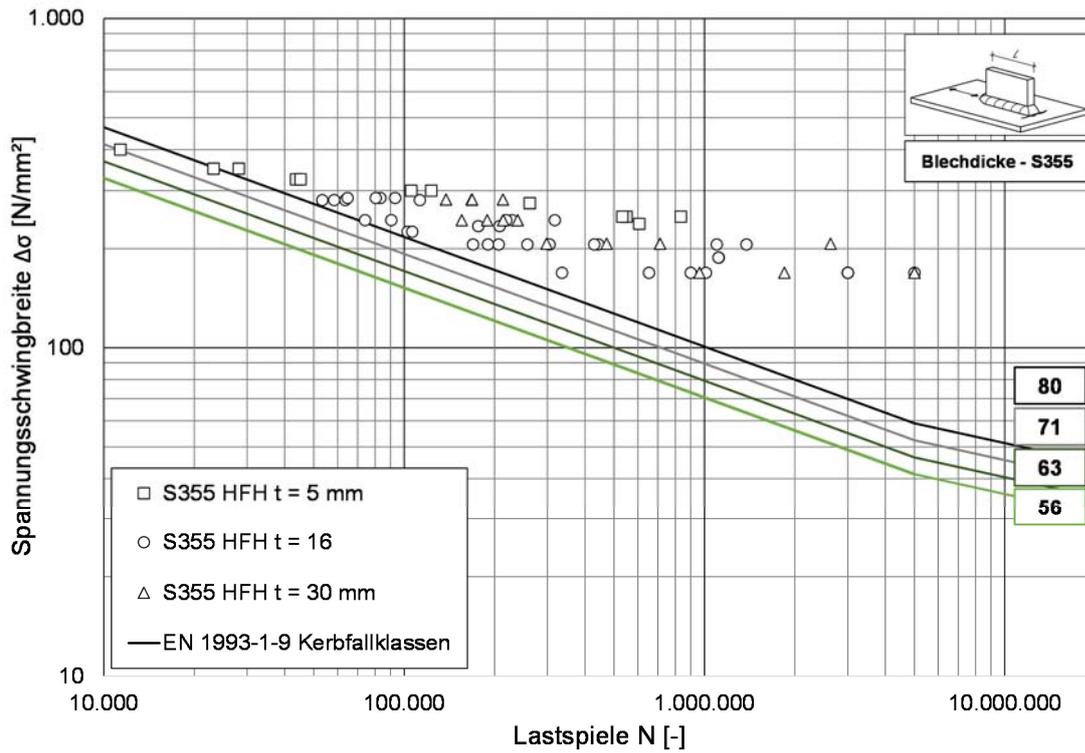


Abbildung 5-45: Blechdickeneinfluss an der HFH-behandelten Längssteife aus S355

Figure 5-45: Plate thickness effect of HFMI-treated longitudinal stiffeners of S355

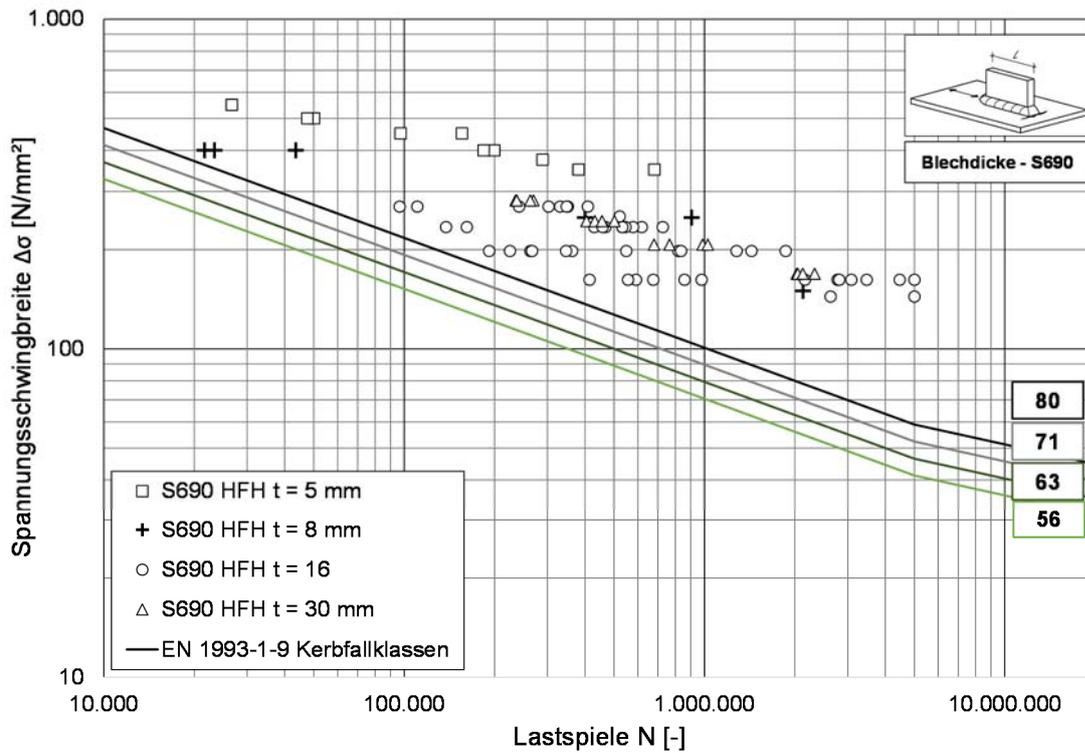


Abbildung 5-46: Blechdickeneinfluss an der HFH-behandelten Längssteife aus S690

Figure 5-46: Plate thickness effect of HFMI-treated longitudinal stiffeners of S690

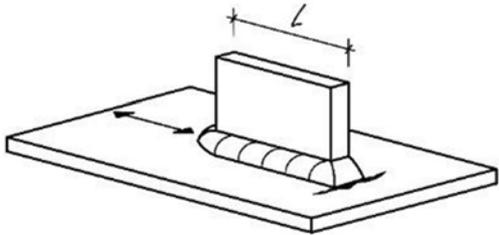
Aus Abbildung 5-45 lassen sich für die Blechdicke $t = 5$ mm relativ gute Versuchsergebnisse im oberen Streubereich erkennen. Die Ergebnisse der Blechdicke $t = 30$ mm liegen nicht ganz so hoch wie die der $t = 5$ mm jedoch sind diese eher im oberen Streubereich angesiedelt. Dagegen scheinen die Versuchsergebnisse der Serie $t = 16$ mm geringere Lastwechselzahlen erreicht zu haben und auch mehr zu streuen.

Für die Probekörper aus hochfestem Baustahl S690 ergibt sich eine ähnliche Tendenzen was die unterschiedlichen Blechdicken anbelangt. Jedoch ist die Punktwolke gegenüber S355 verglichen mit den Kerbfalllinien nach DIN EN 1993-1-9 [16] etwas angehoben.

Die statistische Auswertung der in Abbildung 5-45 und Abbildung 5-46 gezeigten Versuchsdaten nach Anhang A ist in Tabelle 31 in Abhängigkeit der Stahlgüte und Blechdicke gegeben.

Tabelle 31: Übersicht zur Auswertung des Blechdickeneinflusses der Längssteife

Table 31: Overview of evaluation on longitudinal stiffener with regard to plate thickness effects

		Bezugswert der Spannungsschwingbreite bei 2×10^6 LW $\Delta \sigma_c$ [N/mm²] (m) (N_{Versuche}) *Auswertung der vorliegenden Versuchsdaten nach Hintergrunddokument [84] (exkl. DL, BT, TV)				m
		t [mm]				
Stahlgüte nach DIN EN 10025	Nachbehandlung	30	16	8	5	
S355	AW	84,3 (3,2) (7)	70,1 (3,0) (18)			variabel
	HFH	119,8 (4,5) (14)	113,3 (4,6) (23)		203,8 (8,8) (12)	
S690	AW	76,8 (2,7) (8)	61,7 (2,8) (18)	68,2 (3,1) (5)		
	HFH	161,7 (4,2) (16)	152,8 (4,1) (29)	164,5 (6,5) (5)	255,8 (6,3) (10)	
S355	AW	81,9 (3) (7)	70,6 (3) (18)			fix
	HFH	130,1 (5) (14)	121 (5) (23)		119,1 (5) (12)	
S690	AW	82,5 (3) (8)	65,2 (3) (18)	68,8 (3) (5)		
	HFH	165,3 (5) (16)	159,5 (5) (29)	123,0 (5) (5)	212,0 (5) (10)	

Eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 31 ist für die unbehandelten und HFH-behandelten Serien in Abbildung 5-47 gegeben.

Demnach zeigt sich für die Stahlgüte S355 kaum Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit bei variierender Blechdicke. Bei Betrachtung der unbehandelten Serien, fällt jedoch auf, dass die Tendenz, also eine leicht ansteigende Ermüdungsfestigkeit bei dickeren Blechen auch für unbehandelte Längssteifen zu Stande kommt. Ein Grund dafür liegt sowohl für den unbehandelten als auch für den behandelten Zustand voraussichtlich in dem verzögerten Risswachstum bei größeren Blechdicken.

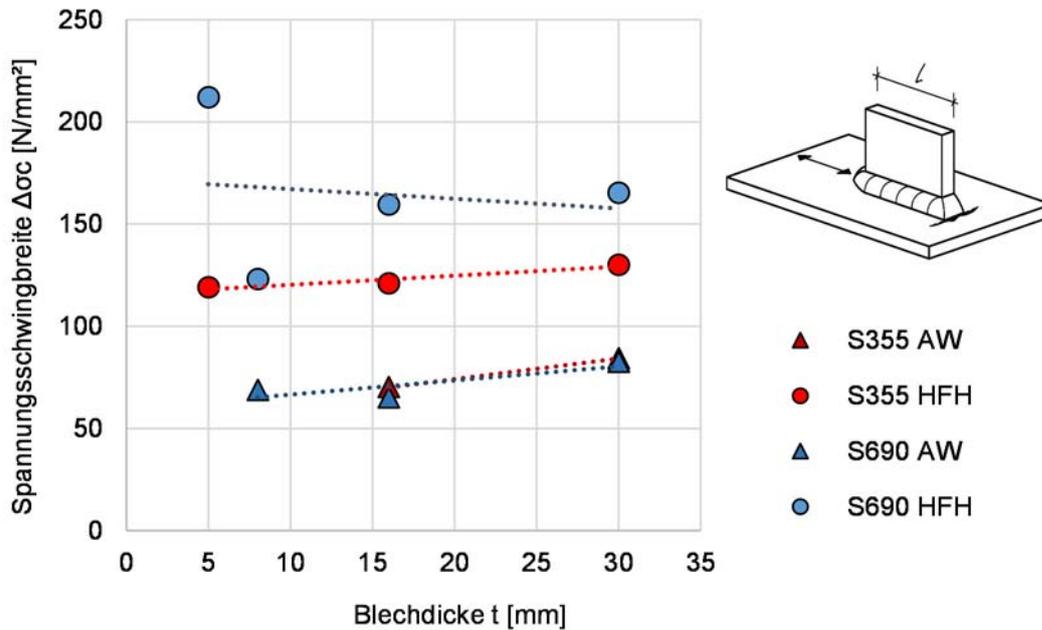


Abbildung 5-47: Blechdickeneinfluss an der Längssteife aus S355 und S690 unter Auswertung mit fixer Neigung [3]

Figure 5-47: Plate thickness effect of longitudinal stiffener of S355 and S690 under evaluation with fixed slope [3]

5.5 Evaluierung von kerbdetailübergreifenden Einflüssen

5.5 *Evaluation of influences non-dependent of construction detail*

5.5.1 Einfluss mehrstufiger Belastung / Überlasten

5.5.1 *Effect of multistage loading / overloads*

5.5.1.1 *Allgemeines*

Der überwiegenden Anzahl wissenschaftlicher Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit HFH-behandelter Schweißnähte liegen Ermüdungsversuche zu Grunde, die unter einstufiger, sinusförmiger Beanspruchung (Wöhler-Versuch) durchgeführt sind. Die in Realität auftretenden Betriebsbelastungen unterscheiden sich in der Regel im Beanspruchungs-Zeit-Verlauf von den Beanspruchungen im Wöhlerversuch [47]. Zudem können bei der Montage einer Konstruktion sowie während der Nutzungsdauer unplanmäßig oder auch planmäßig Überlastsituationen auftreten. Das zu entwickelnde Bemessungsmodell soll dies berücksichtigen, indem ein geeigneter Anwendungsbereich bzw. Anwendungsgrenzen definiert werden. Dazu erfolgt eine Auswertung relevanter Versuchsserien aus der erstellten Datenbank (siehe Abschnitt 4) sowie der experimentellen Untersuchungen zum Einfluss mehrstufiger Belastung in Abschnitt 3.6.

5.5.1.2 *Vorliegende Untersuchungen unter quasistatischer Beanspruchung*

Die Wirksamkeit einer HFH-Behandlung ist auf den positiven Einfluss von induzierten Druckeigenstressungen bis zu einer Tiefe von 1,5 mm bis 2 mm sowie auf eine Randschichtverfestigung des ermüdungskritischen Schweißnahtübergangs zurückzuführen [97]. Damit die Wirksamkeit der HFH gegeben ist, sind die erzeugten Randschichtveränderungen zu erhalten und es ist sicherzustellen, dass quasistatische wie auch zyklische Beanspruchungen zu keinem Abbau der Eigenstressungen führen [90]. In [90] werden Untersuchungen zum Einfluss quasistatischer Druck- und Zugvorbeanspruchung in Höhe der Streckgrenze des Grundmaterials durchgeführt. Die Vorbeanspruchungen werden einmalig aufgebracht und die Stumpfstöße aus S355J2 anschließend im Ermüdungsversuch bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R^\circ=0,1$ geprüft. Es wird festgestellt, dass die durch die Nachbehandlung erzeugten Eigenstressungen auch nach einer einmaligen Vorlast erhalten bleiben. Zurückgeführt wird dies auf eine durch die Nachbehandlung im Vergleich zum Ausgangszustand erhöhte Randstauch- bzw. Randstreckgrenze [90], [97]. Eine einmalige quasistatische Druck- oder Zugvorbeanspruchung bewirkt keine Reduktion der Ermüdungsfestigkeit, siehe Abbildung 5-48. Der Einfluss mehrfach auftretender quasistatischer Vorbeanspruchungen wird in [90] nicht untersucht.

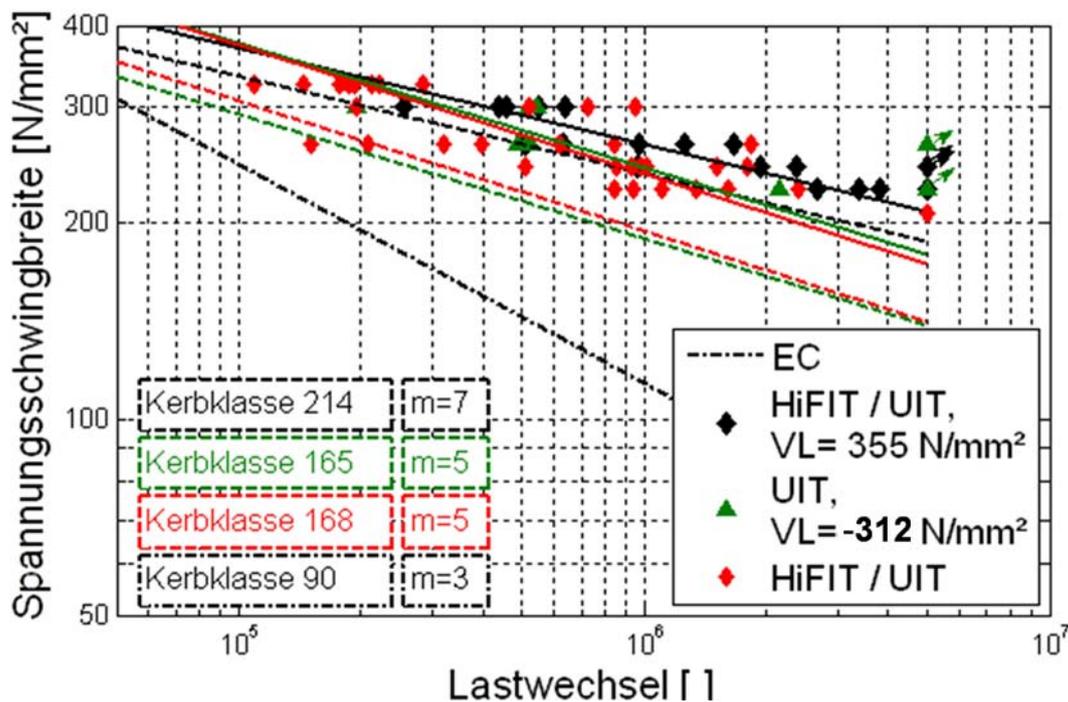


Abbildung 5-48: Nennspannungswöhlerlinien für Stumpfstöße aus S355J2: Vergleich HFH-behandelter und anschließend mit einer quasistatischen Zug- bzw. Drucklast beanspruchten mit ausschließlich HFH-behandelten Referenzprüfkörpern, $R = 0,1$ [90]

Figure 5-48: S-N curve for nominal stress of butt welded joints, steel grade S355J2: Comparison of HFMI-treated and quasi-static preloaded joints with exclusively HFMI-treated joints, $R = 0.1$ [90]

5.5.1.3 Anwendungsgrenzen verfügbarer Regelwerke

Verfügbare Regelwerke und Bemessungsempfehlungen formulieren Anwendungsgrenzen für die Bemessung von nachbehandelten Schweißnähten. Die in den jeweiligen Quellen definierten Anwendungsgrenzen sind in Tabelle 32 zusammengestellt. Zumeist basieren die angegebenen Anwendungsgrenzen auf experimentellen Untersuchungen.

Im Rahmen von REFRESH [90] werden keine Anwendungsgrenzen bezüglich maximal zulässiger Spannungen oder Spannungsschwingbreiten definiert, sondern die Anwendbarkeit des entwickelten Bemessungsmodells für Anwendungen im Zeitfestigkeitsbereich für Lastspielzahlen von $N \geq 10^5$ empfohlen. Dies stellt somit eine indirekte Anwendungsgrenze dar. Dürr empfiehlt, die auftretende Spannung σ im Druckbereich auf einen Wert von 25 % der Streckgrenze zu begrenzen. In den IIW-Empfehlungen für Verfahren zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Verbindungen von Haagensen und Maddox [45] wird in der aktuellsten Version lediglich die maximale Spannung σ auf einen Wert von 80 % der Streckgrenze begrenzt. Eine Begrenzung im Druckspannungsbereich, wie sie in früheren Versionen [46] formuliert wird, entfällt. Anzumerken ist, dass [45] für die Nachbehandlungsverfahren WIG-Wiederaufschmelzen, Nadeln und konventionelles Hämmern gilt. Verglichen mit dem konventionellen Hämmern arbeiten die HFH-Verfahren bei höheren Frequenzen größer 150 Hz und erzielen dadurch einen höheren Überdeckungsgrad der einzelnen Eindrücke [92]. Dadurch wird eine gleichmäßigere plastische Deformation des Nahtübergangsbereichs erreicht, die eine verzögerte Rissinitiierung zur Folge hat [100].

Die IIW-Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißverbindungen [68] greifen auf die Anwendungsgrenze der maximalen Spannung σ von 80 % der Streckgrenze in [45] zurück und begrenzen die maximal zulässige Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ auf einen Wert von 90 % der Streckgrenze. Des Weiteren wird in [66] darauf verwiesen, dass systematische Untersuchungen zu geeigneten Anwendungsgrenzen bislang fehlen. Aufgrund dessen werden die in [45] formulierten Grenzen übernommen. Diese Anwendungsgrenzen werden von Berg [2] für Schweißverbindungen aus ultrahochfesten Stählen übernommen, wobei der Anwendungsbereich gleichermaßen in den Druckbereich erweitert wird. Untersuchungen dazu werden in [2] nicht durchgeführt. Festzustellen bleibt, dass bezüglich geeigneter Anwendungsgrenzen sowie zum Einfluss von Überlasten nur wenige Untersuchungen vorliegen.

Tabelle 32: Anwendungsgrenzen für die Bemessung nachbehandelter Schweißnähte nach verschiedenen Regelwerken und Bemessungsempfehlungen

Table 32: Limits of application for design of HFMI-treated joints according to different recommendations and design proposals

Quelle	Regelwerk / Bemessungsansatz	Anwendungsgrenze bezüglich Spannung $\sigma_{\min/\max}$	Anwendungsgrenze bezüglich Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$
	IIW-Empfehlungen (Nadeln / Hämmern)	$\sigma \leq 0,8 \cdot f_y$	-
[30]	Dürr	$-0,25 \cdot f_y \leq \sigma$	-
[90]	REFRESH	-	-
[66]	IIW-Empfehlungen (höherfrequentes Hämmern)	$\sigma \leq 0,8 \cdot f_y$	$\Delta\sigma \leq 0,9 \cdot f_y$
[2]	Berg	$-0,8 \cdot f_y \leq \sigma \leq 0,8 \cdot f_y$	$\Delta\sigma \leq 0,9 \cdot f_y$

5.5.1.4 Evaluierung der Versuchsreihen zur Definition von Anwendungsgrenzen

Die Auswertung dieser Versuchsserien erfolgt in Abbildung 5-49. Berücksichtigt werden zum einen Stumpfstoße (S1) mit Blechdicken von 16 mm aus den Werkstoffen S355J2 und S690QL, die vor Versuchsbeginn durch eine quasistatische Last vorbeanspruchert werden. Zum anderen werden Quersteifen (QS) aus Abschnitt 3.7 mit Blechdicken von 12 mm aus S355J2+N berücksichtigt, die vor Versuchsbeginn mit einer zyklischen Vorlast von 100 Lastspielen vorbeanspruchert werden. Den Ermüdungsversuchen liegt ein Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ zu Grunde. Aufgrund der Tatsache, dass bei allen acht Versuchsserien vor Versuchsbeginn Überlasten aufgebracht werden, erfolgt eine gemeinsame Auswertung. In Abbildung 5-49 ist auf der Abszisse das Verhältnis der aufgetragenen Vorlast zur tatsächlichen Streckgrenze ($f_{y,real}$) aufgetragen. Die Ordinate gibt die Verbesserung an, die von den einzelnen Versuchsserien nach Aufbringen einer Vorlast noch erreicht wird. Der Verbesserungsfaktor wird berechnet, indem die Ermüdungsfestigkeit des HFH-behandelten Details $\Delta\sigma_{c,HFH}$ am Einhängewert bei $N_c = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen durch den Referenzkerbfall des EC3 $\Delta\sigma_{c,AW,EC3}$ für den Zustand „wie geschweißt“ geteilt wird. Die Auswertung der HFH-behandelten Details erfolgt mit freier Neigung. Im Diagramm in Abbildung 5-49 stellt jeder Datenpunkt somit das Ergebnis einer vollständigen Versuchsserie dar. Die Datenpunkte auf der Abszisse bei einer Vorlast von

0 stellen die Ergebnisse der Referenzserien ohne Vorlast dar. Als Beispiel erreichen die Quersteifen der Referenzserie (Referenzwert QS_355 ohne Vorlast, violett dargestellt) einen Verbesserungsfaktor von 1,75. Dieser entspricht einer Ermüdungsfestigkeitssteigerung von 75 % im Vergleich zum EC3. Die horizontal strichlierten Linien geben den Verbesserungsfaktor an, der sich unter Verwendung der Bemessungswöhlerlinie der IIW-Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißnähte [68] (HFMI IIW Recommendations) ergibt.

Anhand der Lage der Datenpunkte der jeweiligen Serien wird ersichtlich, dass sich Druck-Vorlasten ungünstiger auf die erreichbare Verbesserung HFH-behandelter Schweißnähte auswirken als Zug-Überlasten. Im Falle der Druck-Vorlasten werden Verbesserungen im Bereich von 35 % bis 82 % erreicht, während im Falle der Zug-Vorlasten Verbesserungen im Bereich von 82 % bis 159 % erreicht werden. Deutlich geringer fällt die Verbesserung der Quersteifen im Zustand „wie geschweißt“ aus, die als Referenz im Diagramm eingezeichnet sind (grüne Dreiecke). Bezüglich der Bemessungswöhlerlinie der IIW-Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißnähte [68] ist festzustellen, dass diese für zwei Versuchsserien im Falle der Druck-Vorlasten nicht konservativ sind. Diesbezüglich sei darauf hingewiesen, dass in diesen Empfehlungen keine Anwendungsgrenzen im Druckbereich definiert sind.

Ein Vorschlag für die Anwendungsgrenzen lässt sich in Abbildung 5-49 in Form des grau schraffierten Bereichs definieren. Die Ergebnisse aller Versuchsserien von HFH-behandelten Konstruktionsdetails bilden die Umhüllende, wobei kein Ergebnis in diesen Bereich fällt. Lediglich die Referenzprüfkörper im Zustand „wie geschweißt“ liegen innerhalb dieses Bereichs. Somit lassen sich die Anwendungsgrenzen definieren zu:

$$-0,8 \cdot f_y \leq \sigma \leq 1,0 \cdot f_y \quad (5.4)$$

Die zu definierenden Verbesserungen für das zu entwickelnde Bemessungsmodell sollen innerhalb dieses Anwendungsbereiches liegen.

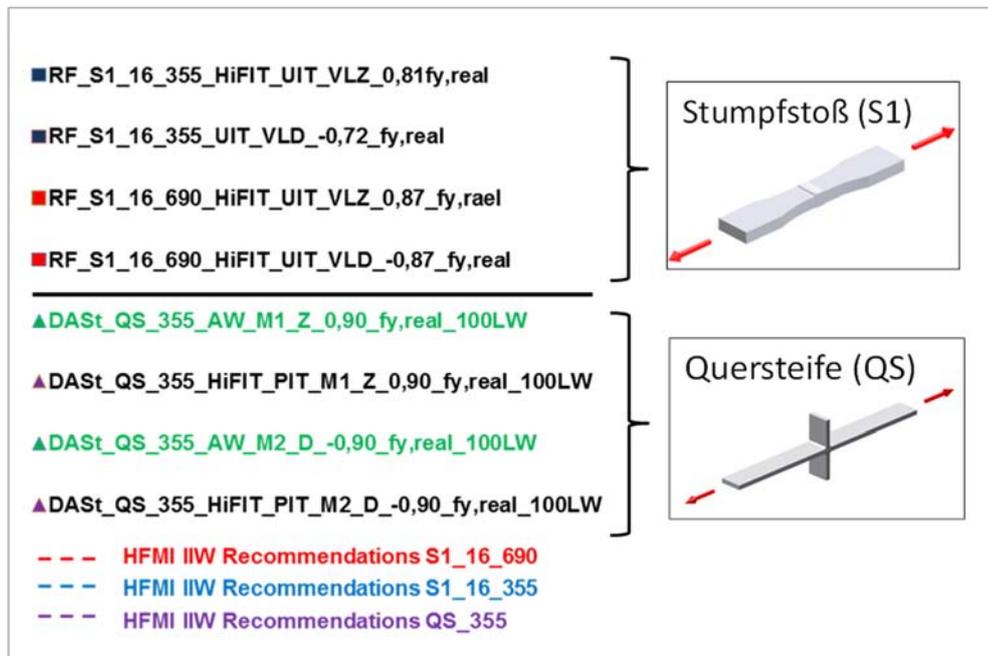
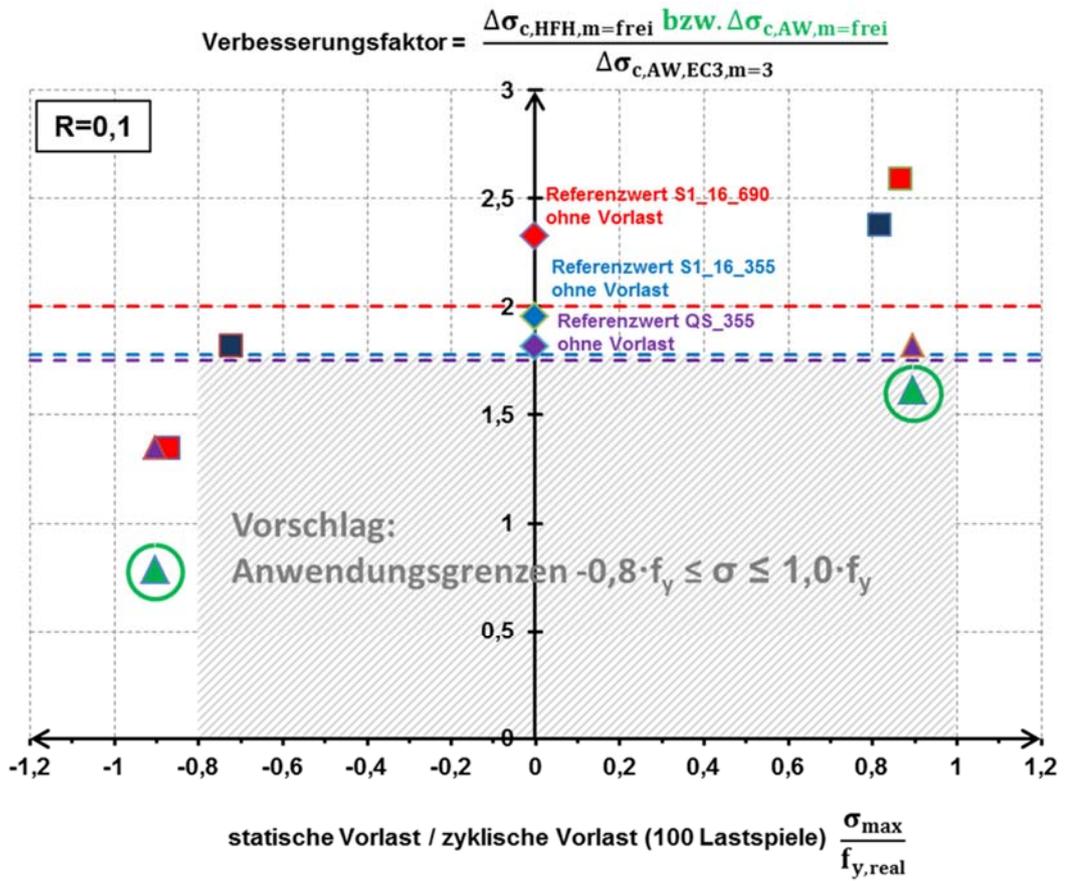


Abbildung 5-49: Erreichbare Verbesserung HFH-behandelter Prüfkörper nach Aufbringen einer Überlast vor Versuchsbeginn, Auswertung mit freier Neigung und realer Streckgrenze, $R = 0,1$

Figure 5-49: Improvement of HFMI-treated specimens after applying an overload before fatigue testing, evaluation based on a free slope and actual yield strength, $R = 0.1$

5.5.2 Vorbelastung

5.5.2 Fatigue preloading

5.5.2.1 Allgemeines

Im Rahmen des Projekts wird in Abschnitt 3.7 die Wirksamkeit von HFH-Verfahren an Prüfkörpern untersucht, die vor der HFH-Behandlung eine Ermüdungsvorbeanspruchung erfahren haben. Anhand dessen lässt sich das Potential der HFH-Verfahren zur Restlebensdauererweiterung bestehender Konstruktionen beurteilen. Insbesondere wird basierend auf relevanten Versuchsserien aus der erstellten Datenbank (siehe Abschnitt 4) überprüft, ob sich das zunächst für „Neukonstruktionen“ zu entwickelnde Bemessungsmodell auch auf Konstruktionen anwenden lässt, die bereits eine inhärente Schädigung aufweisen.

5.5.2.2 Vorliegende Untersuchungen zum Einfluss einer Ermüdungsvorbelastung

Die Anwendbarkeit von HFH-Verfahren im Bestand und deren Potenzial zur Restlebensdauererweiterung wird im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten untersucht und aufgezeigt, siehe z.B. [61], [90], [80], [93], [94]. Darüber hinaus liegen erste Erkenntnisse zur Wirksamkeit einer HFH-Behandlung bei reparaturgeschweißten Bauteilen vor, siehe [61], [95].

Umfangreiche Untersuchungen zur Restlebensdauererweiterung werden vor allem in [90] und [99] durchgeführt. Es wird festgestellt, dass die HFH-Behandlung unter der Voraussetzung dass kein Makroriss mit einer Rissgröße von $a \geq 0,5$ mm vorhanden ist, zur gleichen Steigerung der Ermüdungsfestigkeit wie bei ungeschädigten Schweißverbindungen führt. Dies gilt unabhängig vom Vorschädigungsgrad. Die zugehörigen Ermüdungsversuche werden bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ durchgeführt. Für Risstiefen größer als 0,5 mm wird eine eingeschränkte Wirksamkeit der HFH-Verfahren festgestellt, wobei für vorgeschädigte Längssteifen bei Risstiefen größer als 0,5 mm noch eine geringe Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit, verglichen mit den Proben im Zustand „wie geschweißt“, erhalten wird. Zurückgeführt wird dies vor allem auf die induzierten Druckeigenstressungen, die ein Riss-schließen zur Folge haben können [99]. Für eine fundierte Bewertung zum Einfluss vorhandener Anrisse und insbesondere des Einflusses der vorliegenden Anrisstiefe aus einer Vorbelastung, wird auf die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen verwiesen.

5.5.2.3 Evaluierung der Versuchsreihen zum Einfluss einer Ermüdungsvorbelastung

Um zu überprüfen, ob sich das für „Neukonstruktionen“ zu entwickelnde Bemessungsmodell auch auf Konstruktionen anwenden lässt, die bereits eine inhärente Schädigung aufweisen, werden die betreffenden Versuchsserien aus der erstellten Datenbank (siehe Abschnitt 4) ausgewertet.

Es werden alle Versuchsserien, die vor der HFH-Behandlung eine Ermüdungsvorbelastung erfahren haben, herangezogen. Die Auswertung dieser Versuchsserien erfolgt in Abbildung 5-50. Berücksichtigt werden folgende Konstruktionsdetails:

- Stumpfstöße (S1/S2) mit Blechdicken von 16 mm und 30 mm aus den Werkstoffen S355J2, S460M und S690QL
- Quersteifen (QS) mit Blechdicken von 12 mm und 30 mm aus den Werkstoffen S355J2 und S460M
- Längssteifen (L1) mit Blechdicken von 16 mm aus dem Werkstoff S355J2

Den Ermüdungsversuchen liegt ein Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ zu Grunde. Bei sieben von neun ausgewerteten Versuchsserien wird vor der HFH-Behandlung eine Ermüdungsvorbelastung aufgebracht, die genau oder nahezu der rechnerischen Lebensdauer entspricht. Aus diesem Grund erfolgt eine gemeinsame Auswertung. Lediglich bei zwei Versuchsserien entspricht die Ermüdungsvorbelastung der halben rechnerischen Lebensdauer. In Abbildung 5-50 sind auf der Abszisse die einzelnen Versuchsserien aufgetragen. Jeder Balken steht für eine Serie, die Farbe gibt den zugehörigen Werkstoff an. Grün steht für S235JR, rot für S355J2, hellblau für S460M und dunkelblau für einen S690QL.

Die Ordinate gibt die Verbesserung an, die von den einzelnen Versuchsserien nach Aufbringen einer Vorlast und der anschließenden HFH-Behandlung noch erreicht wird. Die Lastspielzahlen der Vorbelastung werden dabei nicht berücksichtigt. Der Verbesserungsfaktor wird berechnet, indem die Ermüdungsfestigkeit des vorbelasteten und HFH-behandelten Details $\Delta\sigma_{c,HFH}$ am Einhängewert bei $N_c = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen durch den Referenzkerbfall des EC3 $\Delta\sigma_{c,AW,EC3}$ für den Zustand „wie geschweißt“ geteilt wird. Die Auswertung der HFH-behandelten Details erfolgt mit freier Neigung. Im Diagramm in Abbildung 5-50 stellt jeder Balken somit das Ergebnis einer vollständigen Versuchsserie dar. Als Beispiel erreichen die Stumpfstöße der Serie 1 (1. Balken, Bezeichnung 1_S2_16_355_HiFIT_UIT_V) einen Verbesserungsfaktor von 1,75. Dies entspricht einer Ermüdungsfestigkeitssteigerung von 75 % im Vergleich zum Kerbfall des EC3. Die gelben Rautensymbole mit den zugehörigen Werten geben den Verbesserungsfaktor an, der sich unter Verwendung der Bemessungswöhlerlinien der IIW-Empfehlungen für die jeweiligen HFH-behandelten Details [68] (HFMI IIW Recommendations) ergibt. Im vorgestellten Beispiel ergibt sich unter Verwendung der IIW-Empfehlungen ein Wert von 1,78. Dieser Wert liegt geringfügig auf der unsicheren Seite.

Anhand der Länge der einzelnen Balken ist ersichtlich, dass alle ausgewerteten Versuchsserien einen Verbesserungsfaktor von 1,0 erreichen. Das bedeutet, dass alle Konstruktionsdetails durch die HFH-Behandlung wieder in den „Neuzustand“ eines geschweißten und unbehandelten Bauteils versetzt werden können. Für die Versuchsserien, welchen eine ausreichend große Anzahl an Versuchen zugrunde liegt, ist das Bemessungsmodell der IIW-Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißnähte [68] überwiegend zutreffend und konservativ. Die Wirksamkeit der HFH-Behandlung ist bei diesen Versuchsserien unabhängig vom Vorschädigungsgrad gegeben. Dies gilt jedoch nicht für drei der grün umkreisten Bemessungswerte und die dazugehörigen Versuchsserien. In diesen Fällen werden geringere Ermüdungsfestigkeiten erreicht, die vor allem den Serien mit wenigen Versuchen entstammen. Aus diesen geringen Versuchszahlen resultieren große Streuungen. Der Versuchsumfang dieser Serien beträgt lediglich fünf bis maximal sieben Versuche. Ein Indiz für die hohe Wirksamkeit der HFH-Behandlung stellen die hohen Mittelwerte der erreichten Ermüdungsfestigkeit dieser Serien dar.

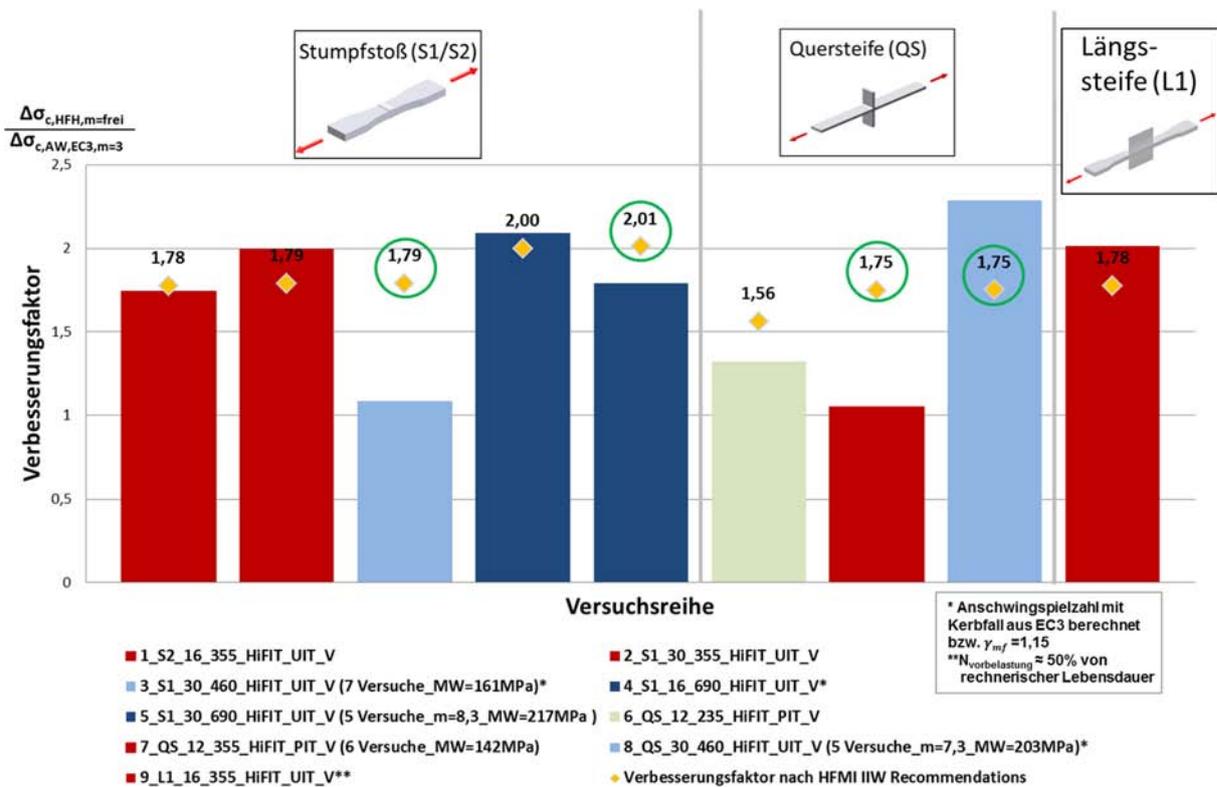


Abbildung 5-50: Erreichbare Verbesserung HFH-behandelter Prüfkörper nach Ermüdungsvorbelastung vor der HFH-Behandlung, Auswertung mit freier Neigung und Schwingspielen nach HFH-Behandlung, $R = 0,1$

Figure 5-50: Improvement of HFMI-treated specimens after applying a fatigue preload prior to HFMI-treatment, evaluation based on a free slope with load cycles after HFMI-treatment, $R = 0.1$

Im Zuge der Entwicklung des Bemessungsmodells für HFH-behandelte Schweißnähte ist zu überprüfen, ob die bei Neubauteilen festzustellende Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit in gleicher Höhe auch für Bauteile im Bestand angesetzt werden darf. Anhand von Abbildung 5-50 ist das Potenzial der HFH-Verfahren für die stark belegten Versuchsserien deutlich erkennbar und somit gegeben. Dies trifft nicht auf alle Serien zu, wobei der Hauptgrund bei diesen „kritischen“ Serien in der geringen Versuchsanzahl und der daraus resultierenden, großen Streuung zu liegen scheint. In [90] wird die Voraussetzung formuliert, dass bei nachzubehandelnden Bauteilen keine Makrorisse mit einer Rissgröße von $a \geq 0,5$ mm vorliegen dürfen. Auch in diesem Projekt werden Prüfkörper identifiziert, bei denen ein vorzeitiges Ermüdungsversagen von einem Anriss ausgeht, der vor der HFH-Behandlung nicht detektiert wird. In [90] sind ähnliche Fälle am Beispiel von Längssteifen beschrieben. Nach einer Ermüdungsvorbelastung und der anschließenden HFH-Behandlung wird ein Ermüdungsversagen ausgehend von verdeckten bzw. übersehenen Anrissen beobachtet. Darüber hinaus kommt es bei den ermüdungsvorbelasteten Längssteifen auch zu einer Verlagerung der Anrisse hin zur Nahtwurzel, siehe Abbildung 5-51. In diesem Fall kann das Ausschleifen und erneute Verschweißen des Steifenendbereichs vor einer HFH-Behandlung eine geeignete Maßnahme darstellen.

Um generelle Aussagen zur Anwendung der HFH-Verfahren bei bereits vorgeschädigten Konstruktionen treffen zu können, sind nach Einschätzung der Verfasser weitere Untersuchungen

im Hinblick auf die zutreffende Detektion von Anrissen sowie die Definition kritischer Anrissgrößen erforderlich. Diese Untersuchungen erfordern bruchmechanische Betrachtungen und sollen zukünftigen Forschungsarbeiten vorbehalten sein, woraus der Gültigkeitsbereich des zu entwickelnden Bemessungsmodells für Neukonstruktionen abgeleitet wird.

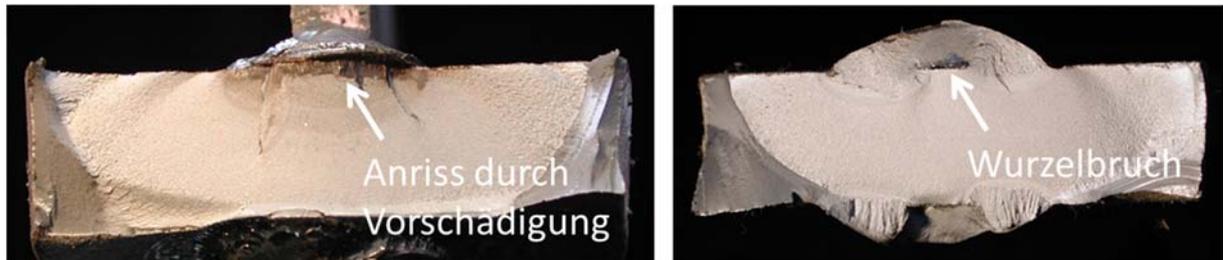


Abbildung 5-51: HFH-behandelte Längssteifen mit Versagen ausgehend von Anriss aus Vorschädigung (links) sowie von der Nahtwurzel (rechts) [90]

Figure 5-51: HFMI-treated longitudinal stiffeners with fatigue failure initiating at a pre-existing crack from preloading (left figure) as well as fatigue failure from weld root (right figure) [90]

5.5.3 Einfluss aus zusätzlichem Strahlen

5.5.3 Effect of blast cleaning

Im Projekt REFRESH [90] wird unter anderem der Einfluss des Reinigungsstrahlens auf die Ermüdungsfestigkeit HFH-behandelter Schweißnähte untersucht. Eine ausführliche Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen erfolgt in [90].

Vor dem Aufbringen des Korrosionsschutzes ist das Reinigungsstrahlen der Bauteile erforderlich. Um den Einfluss des Reinigungsstrahlens auf die Wirksamkeit der HFH-Verfahren zu untersuchen, wird dieser Prozess im Anschluss an eine HFH-Behandlung an Prüfkörpern durchgeführt. Untersucht werden die HFH-Verfahren HiFIT und UIT, die in Abbildung 5-52 gemeinsam ausgewertet sind. Die Ermüdungsversuche werden an Stumpfstoßen aus dem Werkstoff S690QL bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ durchgeführt. Es wird eine HFH-behandelte Referenzserie und eine im Anschluss an die HFH-Behandlung reinigungsgestrahlte Serie geprüft. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass ein zusätzliches Reinigungsstrahlen nach einer HFH-Behandlung eine weitere Steigerung der Ermüdungsfestigkeit zur Folge hat. Die HFH-behandelten Referenzprüfkörper erreichen eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 215 \text{ N/mm}^2$ (rot strichliert dargestellt), die reinigungsgestrahlten Prüfkörper eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 279 \text{ N/mm}^2$ (schwarz strichliert dargestellt). Die Wöhlerlinie der reinigungsgestrahlten Prüfkörper verläuft mit einer Neigung von $m = 8$ deutlich flacher als die der Referenzprüfkörper, siehe Abbildung 5-52. Insbesondere wird die höhere Wirksamkeit der HFH-behandelten und gestrahlten Proben im Vergleich zu den ausschließlich HFH-behandelten Prüfkörpern bei Bruchlastspielzahlen größer 10^6 deutlich. Das breitere Streuband der Ergebnisse der zusätzlich reinigungsgestrahlten Prüfkörper kann auf die beim Strahlvorgang nicht fest definierten Strahlbedingungen zurückgeführt werden [90]. Für die praktische Anwendung ist entscheidend, dass die Wirksamkeit der HFH-Behandlung durch diesen Prozess nicht reduziert wird. Das Reinigungsstrahlen wirkt sich vielmehr positiv auf die erreichte Ermüdungsfestigkeit aus. Zudem wird festgestellt, dass durch das Strahlen angrenzende Werkstoffbereiche oberflächennah verfestigt und Brüche, ausgehend vom Grundmaterial, vor einem Versagen des Nahtübergangs verhindert werden [90].

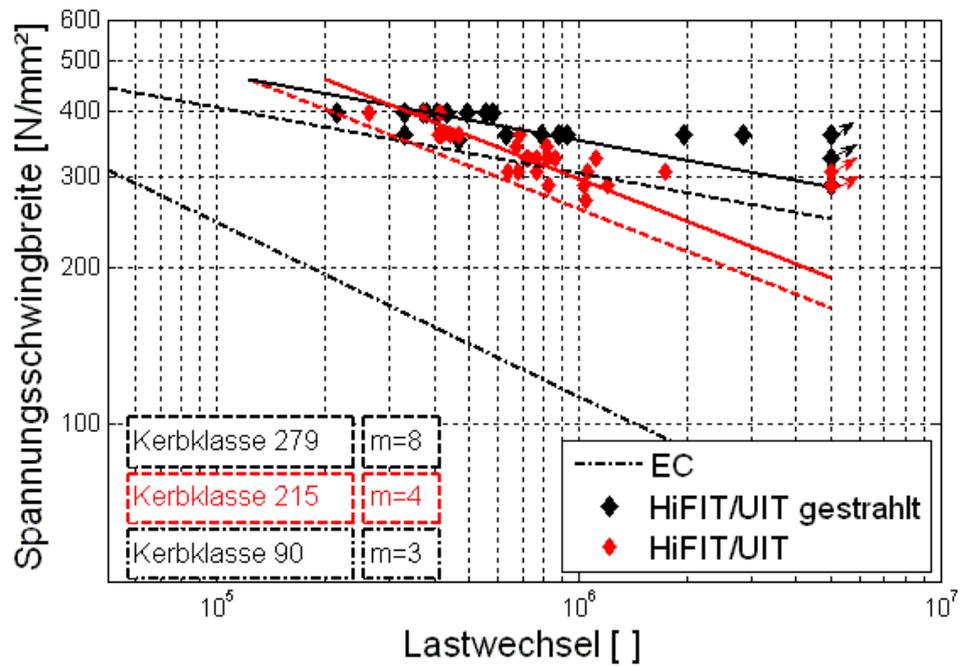


Abbildung 5-52: Nennspannungswöhlerlinien für Stumpfstöße aus S690QL: Vergleich HFH-behandelter und anschließend reinigungsgestrahelter mit ausschließlich HFH-behandelten Referenzprüfkörpern, R = 0,1 [90]

Figure 5-52: S-N curve for nominal stress of butt welded joints, steel grade S690QL: Comparison of HFMI-treated and blast cleaned joints with exclusively HFMI-treated joints, R = 0.1 [90]

5.6 Allgemeine Schlussfolgerungen

5.6 General conclusions

In diesem Kapitel werden allgemeine Betrachtungen zur Absicherung genereller Annahmen abgeleitet. Tendenzen die sich verallgemeinern, beispielsweise auf ein gesamtes Detail ableiten lassen werden im Folgenden betrachtet.

5.6.1 Wöhlerlinienneigung

5.6.1 Slope of the S-N curve

Prinzipiell hängt die Neigung der Wöhlerlinie m von der Kerbschärfe eines Ermüdungsdetails ab. So gilt nach DIN EN 1993-1-9 [16] für geschweißte Konstruktionen generell eine Neigung von $m = 3$ für $N \leq 5 \times 10^6$ und $m = 5$ für $N \leq 10^8$. Dabei ist eine Wöhlerlinienneigung von $m = 3$ zurückzuführen auf Untersuchungen von Gurney und Maddox. [43]

Für nachbehandelte geschweißte Details ergeben sich davon abweichende Neigungen. In [68] wird für HFH-nachbehandelte im relevanten Kurzzeitfestigkeitsbereich $N \leq 5 \times 10^6$ prinzipiell von einer Neigung $m = 5$ ausgegangen. Generell wurde für annähernd alle ausgewerteten Versuchsserien eine flachere Wöhlerlinienneigung als im Schweißzustand belassenen Zustand bestätigt. Das ist begründet in der höheren Wirksamkeit der HFH-Nachbehandlung im Bereich höherer Lastzyklen, siehe auch 7.3.

Abbildung 5-53 zeigt anhand eines Boxplots die Wöhlerlinienneigungen der einzeln ausgewerteten Serien getrennt nach Konstruktionsdetail und Nachbehandlungszustand. Die Gegenüberstellung der Boxplots der drei unbehandelten (Abbildung 5-53 links) und HFH-behandelten Konstruktionsdetails (Abbildung 5-53 rechts) zeigt, dass die HFH-nachbehandelten Serien eine flachere Wöhlerlinienneigung aufweisen, dies ist allgemein bekannt und ist auf ein gutmütigeres Ermüdungsfestigkeitsverhalten vor allem im hohen Lastwechselbereich zurückzuführen.

Die Neigung der unbehandelten Kerbdetails Quersteife und Längssteife bewegt sich um den Faktor 3 mit einer relativ geringen Streuung. Für das Detail Stumpfstoß ergibt sich auch eine Neigung von ca. 3, jedoch ist der Streubereich nach oben und unten etwas größer als bei der Quersteife und Längssteife.

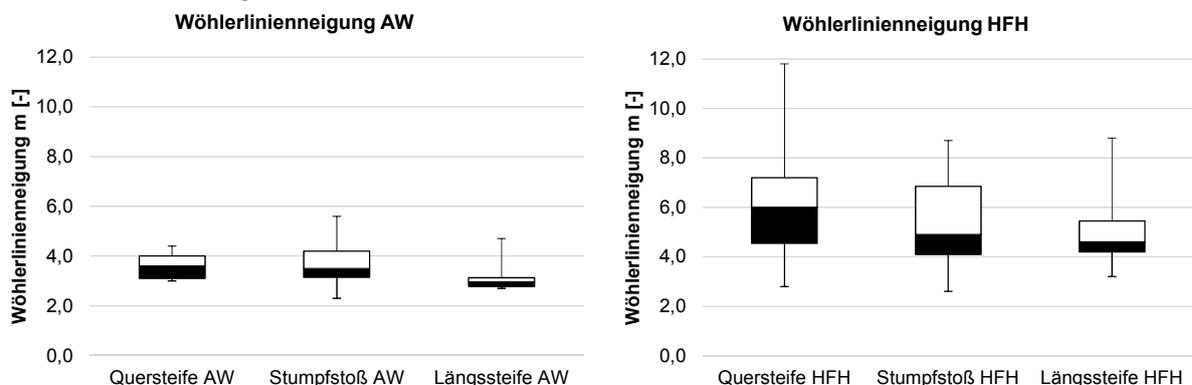


Abbildung 5-53: Vergleich der Wöhlerlinienneigungen in Abhängigkeit des Details und des Nachbehandlungszustands

Figure 5-53: Comparison of slopes for SN curves depending on detail and state of post-weld-treatment

Es wird durch die Angabe von Minimal- und Maximalwerten auch deutlich, dass die ermittelten Neigungen der HFH-behandelten Serien stärker streuen, so sind Werte von knapp unter $m = 3$ möglich, wie auch Werte knapp unter $m = 12,0$. Obwohl die Stichprobengröße der Versuchsserien mit HFH-Nachbehandlung meist größer sind und somit aus Sicht der Stichprobengröße eine geringere Streuung gegeben sein müsste.

Für die einzelnen Konstruktionsdetails lässt sich ableiten, dass die Quersteife im HFH-behandelten Zustand gegenüber den anderen Details den höchsten Mittelwert mit $m = 5,9$ erreicht. Die Details Stumpfstoß und Längssteife liegen im HFH-behandelten Zustand mit 4,7 und 4,6 sehr dicht beieinander.

Zum Zweck der Bestimmung einer Wöhlerlinienneigung im Dauerfestigkeitsbereich wurden HFH-behandelte Stumpfstoße aus S690 von REFRESH [90] am KIT bis zu einer Lastwechselzahl von $N = 10^8$ geprüft. Die Auswertung dieser Versuchsergebnisse hat gezeigt, dass die Annahme einer Neigung von $m = 9$ für HFH-nachbehandelte Stumpfstoße im Bereich zwischen $5 \cdot 10^6 < N < 10^8$ auf der sicheren Seite liegt. Ebenso ist die Annahme einer horizontalen Neigung der Kurve ab einer Lastwechselzahl von $N > 10^8$ konservativ für die betrachteten Versuchsergebnisse.

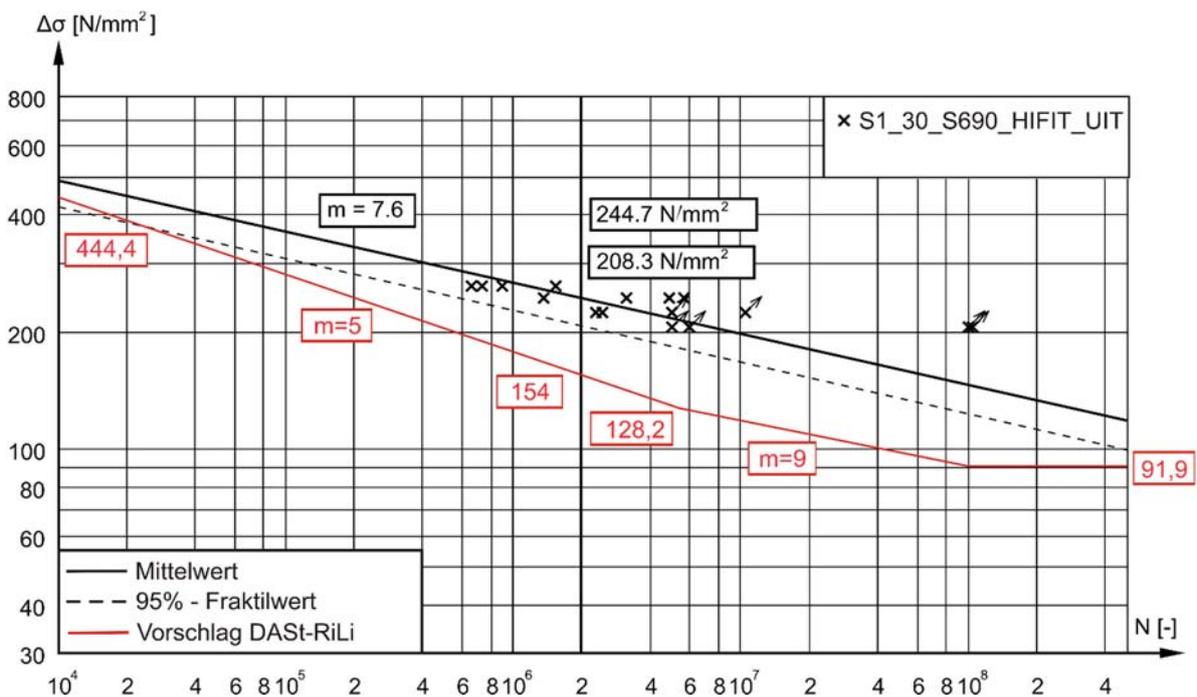


Abbildung 5-54: Versuchsergebnisse und Auswertung von Ermüdungsversuchen aus [90] zur Abschätzung der Neigung im Dauerfestigkeitsbereich

Figure 5-54: Test results and evaluation of fatigue tests from [90] in order to estimate the slope for high cycle fatigue

6 Numerische Untersuchungen

6 *Numerical investigations*

Kurzfassung

In diesem Kapitel werden numerische Modelle der experimentell untersuchten Prüfkörper erstellt und validiert. Mit diesen Modellen werden die durchgeführten Ermüdungsversuche unter Verwendung von lokalen Konzepten nachgerechnet und die zugehörigen Ermüdungsfestigkeiten für diese Konzepte angegeben. Darüber hinaus werden mithilfe der parametrisierten Modelle ermüdungswirksame Einflüsse untersucht und bewertet, um den Gültigkeitsbereich des zu erstellenden Bemessungsmodells zu erweitern.

Abstract

In this chapter, numerical models of the experimentally investigated specimens are developed and validated. Using these models, the fatigue tests performed are recalculated using local approaches and the associated fatigue strength is given for these approaches. In addition, the parameterized models are used to investigate and evaluate effects that are relevant to fatigue in order to extend the scope of the design model.

6.1 Allgemeines

6.1 General

Zur Bewertung ermüdungsrelevanter Einflüsse werden zunächst die im Ermüdungsversuch geprüften Quersteifen charakterisiert und numerische Modelle erstellt. Die numerischen Modelle werden anhand von Dehnungsmessungen validiert und für die Berechnung der Ermüdungsfestigkeit unter Verwendung des Struktur- und Kerbspannungskonzeptes verwendet. Zur Untersuchung ermüdungsrelevanter Einflüsse, wie z.B. dem Abstand der Schweißnahtfußpunkte, werden Parameterstudien unter Anwendung des Kerbspannungskonzeptes durchgeführt.

6.2 Prüfkörpercharakterisierung und Begleituntersuchungen

6.2 Characterisation of specimens and additional studies

Die Charakterisierung der Prüfkörper am KIT erfolgt in Form einer Geometrievermessung der Prüfkörper und der Schweißnähte. Zudem werden die vorliegenden geometrischen Imperfektionen vermessen und dokumentiert sowie anhand von Makroschliffen der vorhandene Einbrand bestimmt. Durchgeführte Dehnungsmessungen im Schweißnahtbereich der Prüfkörper dienen der Validierung des zu erstellenden FE-Modells.

6.2.1 Prüfkörpergeometrie

6.2.1 Dimensions of specimens

Die Prüfkörper werden gemäß Abbildung 6-1 unter Verwendung einer Schiebelehre und Millimeterpapier vermessen. Die Schweißnahtdicke wird jeweils in den Drittelpunkten mit einer Schweißnahtlehre vermessen. Die gemessenen Geometriewerte sind in Tabelle 33 und Tabelle 34 unter Angabe von Mittelwert und Standardabweichung angegeben.

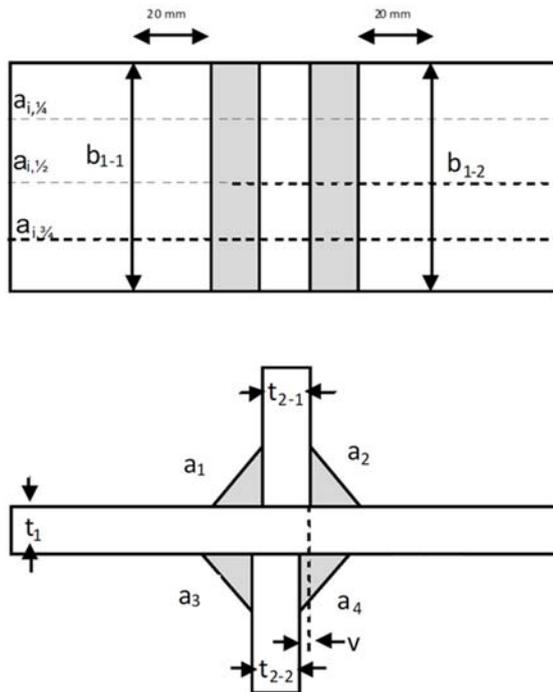


Abbildung 6-1: Schema zur Vermessung der Prüfkörpergeometrie

Figure 6-1: Procedure for measurement of specimen dimensions

Tabelle 33: Geometriewerte der Prüfkörper

Table 33: Dimensions of specimens

	Grundblech		Steifenbleche	
	t_1 [mm]	b [mm]	t_2 [mm]	v [mm]
Mittelwert	12,49	59,47	12,39	0,60
Standardabweichung	0,12	0,99	0,09	0,54
Minimalwert	12,28	52,62	12,21	0,00
Maximalwert	12,80	61,78	12,71	2,00

Tabelle 34: Messwerte der Schweißnahtdicke a

Table 34: Dimensions of weld throat thickness a

	Schweißnahtdicke [mm]			
	$a_{i,0,25,MW}$	$a_{i,0,5,MW}$	$a_{i,0,75,MW}$	Gesamt
Mittelwert	6,25	5,85	6,21	6,04
Standardabweichung	0,59	0,61	0,56	0,62
Minimalwert	5,35	4,85	5,30	4,85
Maximalwert	7,23	7,15	7,20	7,23

6.2.2 Lokale Nahtgeometrie

6.2.2 Dimensions of weld

Die lokale Nahtgeometrie am Schweißnahtübergang wird vor und nach der HFH-Behandlung für die beiden untersuchten Verfahren sowie im Zustand „wie geschweißt“ optisch vermessen, siehe Abbildung 6-2. Die Mittelwerte der gemessenen Geometriewerte sind in Tabelle 35 unter Angabe von Mittelwert und Standardabweichung angegeben.

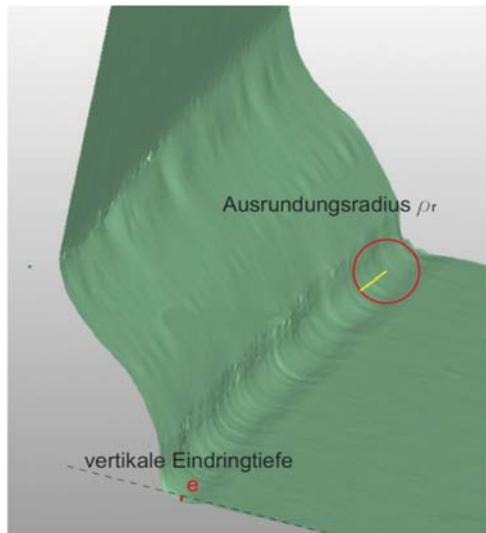


Abbildung 6-2: Vermessung der lokalen Nahtgeometrie

Figure 6-2: Measurement of local weld toe geometry

Tabelle 35: Messwerte der lokalen Nahtgeometrie

Table 35: Dimensions of local weld toe geometry

	Eindruck-tiefe	Eindruck-breite	Nahtanstiegs-winkel	Kerbradius
	e [mm]	b _E [mm]	α [°]	ρ _r [mm]
Mittelwert aw	-	-	51,56	-
Mittelwert HiFIT	0,12	1,32	54,38	1,52
Mittelwert PIT	0,06	1,09	55,12	1,52

6.2.3 Imperfektionen

6.2.3 Imperfections

An den Prüfkörpern wird der Schweißverzug orthogonal zum Grundblech mithilfe der in Abbildung 6-3 dargestellten Messvorrichtung nach ISO/TR 14345 [52] gemessen und für beide Probenschenkel im Bereich von 50mm von Probenende bis 70mm von Probeachse der mittlere Winkelverzug berechnet. Der Winkelverzug auf beiden Seiten der Quersteife ist in Abbildung 6-4 grafisch dargestellt. Der Winkelverzug weist auf beiden Seiten der Probenschenkel eine Streuung im Bereich von $-0,1^\circ \leq \alpha \leq 0,5^\circ$ auf, wobei der mittlere gesamte Winkelverzug mit 0,36 gering ausfällt. Der maximal gemessene Winkelverzug beträgt $0,78^\circ$. Eine Begrenzung

des Winkelverzugs in DIN EN ISO 5817 [25] erfolgt in Anhang C bei den zusätzlichen Anforderungen zu Tabelle 1 für Schweißungen unter Ermüdungsbelastung. Durch die Anforderung eines Winkelverzugs von $\alpha \leq 1$ werden die höchsten Anforderungen an die Bewertungsgruppen B90 und B125 gestellt. Dieser Wert wird von allen vermessenen Prüfkörpern eingehalten.



Abbildung 6-3: Messvorrichtung zur Messung des Verzugs

Figure 6-3: Measuring device for measurement of angular distortion

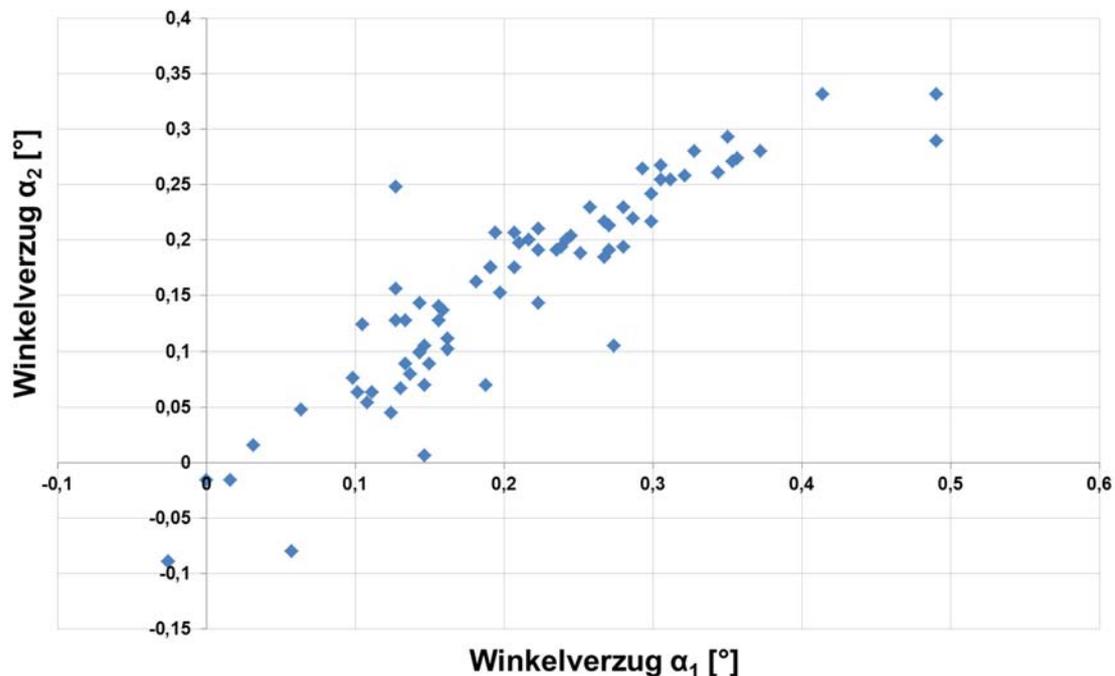


Abbildung 6-4: Gemessener Winkelverzug der Prüfkörper beidseits der Quersteife

Figure 6-4: Measured angular distortion on each side of transverse attachment

6.2.4 Makoschliffe und Härtemessungen

6.2.4 Macro sections

Die horizontale Einbrandtiefe in Grundblechlängsrichtung wird anhand von zwei angefertigten Makroschliffen vermessen. In DIN EN ISO 5817 [25] werden bezüglich des Einbrands keine

Angaben gemacht oder Regelungen im Hinblick auf Unregelmäßigkeiten getroffen. Exemplarisch ist der Makroschliff einer Quersteife in Abbildung 6-5 dargestellt. Der horizontale Einbrand ist in Abbildung 6-5 durch die roten Bemaßungslinien gekennzeichnet. Bei den untersuchten Prüfkörpern liegt in allen Fällen ein horizontaler Einbrand von mindestens 25 % der Steifenblechdicke vor. Teilweise ist dieser asymmetrisch ausgebildet, wie in Abbildung 6-5 zu erkennen ist.

Weiterhin werden an diesen Prüfkörpern im Bereich der Schweißnaht Härteprüfungen nach Vickers für metallische Werkstoffe nach DIN EN ISO 6507-1 [26] durchgeführt. Die Anzahl und die Abstände der Härteeindrücke werden nach DIN EN ISO 9015-1 [27] festgelegt. Der maximal gemessene Härtewert beträgt 258 HV10 und ist somit kleiner als die höchste zulässige Härte von 380 HV10 nach DIN EN ISO 15614-1 [29], Tabelle 2. Die zugehörigen Prüfprotokolle sind in Anhang C dargestellt.

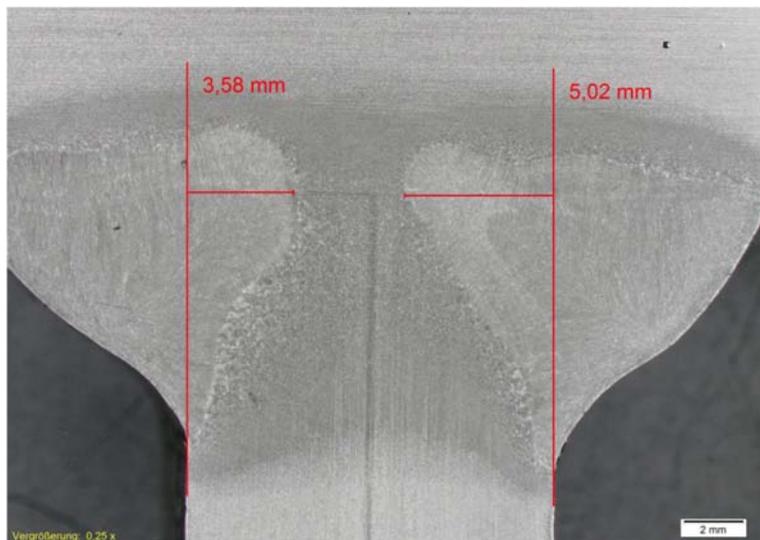


Abbildung 6-5: Makroschliff des Prüfkörpers 3.16: Asymmetrischer Einbrand

Figure 6-5: Macro section of specimen 3.16: asymmetric weld penetration

6.2.5 Dehnungsmessungen

6.2.5 Strain gauge measurements

Zur Validierung des FE-Strukturspannungsmodells werden Dehnungsmessungen an sechs Prüfkörpern durchgeführt. Dazu werden Dehnungsmessstreifen (DMS) auf die Prüfkörper entsprechend der verwendeten Extrapolationsmethode appliziert. Basierend auf den IIW-Empfehlungen [51] werden die DMS im Abstand von 0,4 t und 1,0 t zum Schweißnahtübergang appliziert. Zur Bestimmung der Nennspannung wird ein DMS im Abstand von 5 t vom Schweißnahtübergang appliziert. Abbildung 6-6 zeigt das Applikationsschema sowie ein Foto der applizierten DMS.

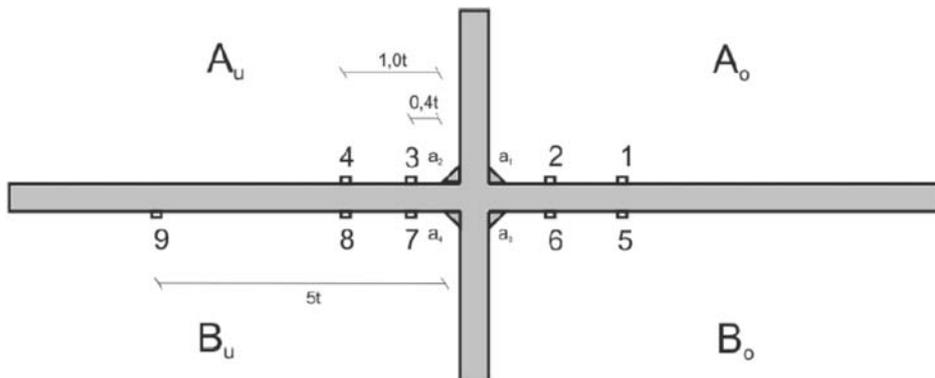


Abbildung 6-6: Applikation der DMS auf Quersteife

Figure 6-6: Application of strain gauges on transverse attachment

Die Dehnungsmessung erfolgt auf einer servohydraulischen Prüfmaschine am KIT, Fabrikat: Instron (maximale Nennkraft 250 kN). Bei der Dehnungsmessung werden die jeweiligen Lastniveaus im späteren Ermüdungsversuch statisch angefahren und die zugehörigen Dehnungen aufgezeichnet. Aus den gemessenen Dehnungen lassen sich die Dehnungen am Hot Spot durch Extrapolation bestimmen und daraus die Spannungen berechnen. Diese werden zur Validierung des FE-Modells in 6.3.3 herangezogen. Insgesamt werden DMS-Messungen an sechs Prüfkörpern aus den Serien zum Mittelspannungseinfluss ($R = -1$) und der Referenzserie ($R = 0,1$) durchgeführt. Aus jeder Serie wird jeweils ein unbehandelter (Zustand aw), ein HiFIT-behandelter und ein PIT-behandelter Probekörper untersucht.



Abbildung 6-7: DMS-Messung an Quersteife am KIT

Figure 6-7: Strain gauge measurement on transverse stiffener at KIT

Die Regelung bei der Durchführung der Versuche erfolgt kraftgesteuert. Bei Erreichen des gewünschten Kraftniveaus werden die Dehnungen der DMS abgelesen. Nach dem Abschluss des Versuchs werden die Messdaten der aufgebrachtten Kraft, sowie die zugehörigen gemessenen Dehnungen der DMS ausgegeben.

6.3 Numerische Untersuchungen

6.3 Numerical analyses

Bei den in Abschnitt 0 und 0 ermittelten Nennspannungswöhlerlinien sind alle ermüdungsrelevante Effekte, wie z.B. Steifengeometrien oder Imperfektionen, direkt in der Wöhlerlinie auf der Seite der Beanspruchbarkeit enthalten. Mithilfe der Numerik erfolgt die Nachrechnung der Ermüdungsversuche und die Berechnung der Ermüdungsfestigkeit unter Anwendung des Struktur- und Kerbspannungskonzepts sowie die Untersuchung ermüdungsrelevanter Effekte.

6.3.1 Strukturspannungskonzept

6.3.1 Structural stress approach

Die Strukturspannung berücksichtigt die spannungserhöhenden Effekte aus der strukturellen Umgebung des konstruktiven Details. Effekte aus der örtlichen Kerbe am Schweißnahtübergang, die durch den Nahtanstiegswinkel und den Nahtübergangsradius beeinflusst werden, bleiben unberücksichtigt [51]. Das Strukturspannungskonzept findet unter anderem Anwendung in Fällen, bei denen es einer genaueren Bewertung des Konstruktionsdetails bedarf. Die Strukturspannungsermittlung erfolgt durch Messungen unter Verwendung von Dehnungsmessstreifen am Versuchskörper oder durch Nachrechnung mit der FE-Methode in festgelegten Ab-

ständen zum Schweißnahtübergang. Im EC 3 Teil 1-9 [16] sind im Anhang B Ermüdungsfestigkeiten für bestimmte Konstruktionsdetails bei Anwendung des Strukturspannungskonzepts angegeben. Eine Übertragung und Einordnung HFH-behandelter Konstruktionsdetails erfolgt für die im Ermüdungsversuch geprüften Quersteifen aus Abschnitt 0. Für die Strukturspannungsermittlung sind verschiedene Konzepte verfügbar, die sich vor allem in Hinblick auf Anzahl und Definition der Extrapolationsstellen sowie in der Art der Extrapolation unterscheiden [95]. Die Empfehlungen des IIW für plattenartige Strukturen [51], [74] finden national und auch international die häufigste Anwendung. Die darin definierten Stützstellen und Extrapolationsmethoden werden auch für die nachfolgend untersuchten Quersteifen verwendet. Es werden Stützstellen in den Abständen $0,4 \cdot t$ und $1,0 \cdot t$ vom Schweißnahtübergang verwendet, siehe Abbildung 6-8. Die Anordnung der Stützstellen wird sowohl für das Applikationsschema der DMS zur experimentellen Ermittlung der Strukturspannungen als auch im Rahmen der numerischen Berechnungen verwendet. Die Ermittlung der Strukturspannungen erfolgt durch eine lineare Oberflächenextrapolation der Spannungen an den Stützstellen zum Schweißnahtübergang unter Verwendung von Gl. (3.3). Verwendet werden die Spannungen senkrecht zur Schweißnaht.

$$\sigma_s = 1,67 \cdot \sigma_{0,4t} - 0,67 \cdot \sigma_{1,0t} \quad (6.1)$$

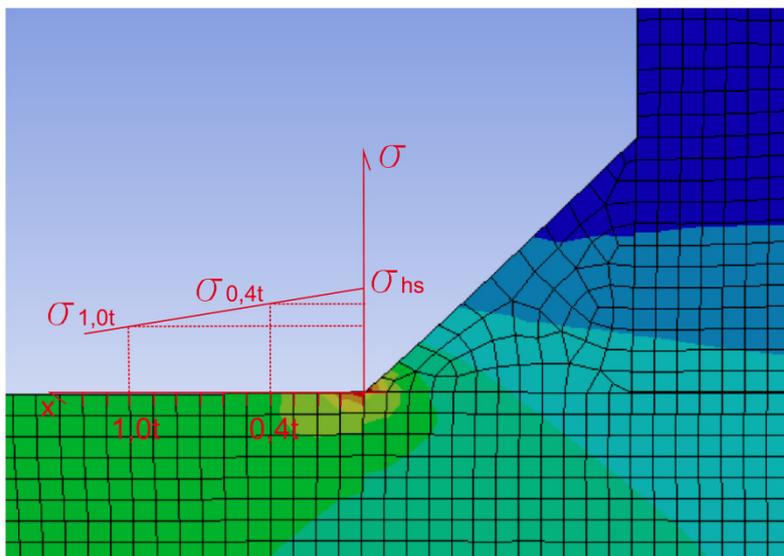


Abbildung 6-8: Strukturspannungskonzept: Lineare Extrapolation der Spannung zum Schweißnahtübergang

Figure 6-8: Structural Hot Spot Stress: Linear extrapolation of stress

6.3.2 Modellbildung für Strukturspannungsberechnung

6.3.2 Numerical modelling for determination of structural stresses

Für die folgenden Untersuchungen werden die geometrischen Eigenschaften der vermessenen Prüfkörper zugrunde gelegt. Für die Abmessungen der Schweißnahtüberhöhung und des Spalts zwischen Grundblech und Steife werden Abmessungen eingeführt, die sich im Rahmen der gemessenen Geometrien bewegen. Die Parameter der Basisgeometrie sind in Tabelle 36 zu sehen. Nachfolgend wird zuerst die Modellerstellung für die Anwendung des Strukturspannungskonzepts sowie das Strukturspannungskonzept selbst vorgestellt. Nach der Validierung

des Strukturspannungsmodells wird das Kerbspannungskonzept sowie die dazugehörige Modellerstellung beschrieben. Nach der Beschreibung der einzelnen Konzepte erfolgen die Auswertungen unter Verwendung dieser Modelle.

Tabelle 36: Basisgeometrie für die numerischen Untersuchungen

Table 36: Basic geometry for numerical analyses

Parameter	Symbol	Ausgangs-Abmessung
a-maß	a	5 mm
a-Maß vertikal	a_v	7,071 mm
a-Maß horizontal	a_h	7,071 mm
Überhöhung der Schweißnaht	h_a	1 mm (Anwendung Kerbspannungskonzept)
Breite Grund- & Steifenblech	b_1, b_2	60 mm
Dicke Grund- & Steifenblech	t_1, t_2	12 mm
Spalt Grund- & Steifenblech	h_s	0,01 mm
Länge Steifenblech	h_2	75 mm
Länge Grundblech	h_1	595 mm
2D-Verhalten		verallgemeinerter ebener Dehnungszustand
Zugspannung im Grundblech	σ	1 N/mm ²

Die numerische Ermittlung der Strukturspannungen erfolgt mit dem FE-Programm ANSYS. Zur Berechnung der Strukturspannung wird ein zweidimensionales Modell unter Ausnutzung der Symmetrie im Hinblick auf die Durchführung von Parameterstudien erstellt, siehe Abbildung 6-9. Es werden Scheibenelemente vom Typ PLANE 182 mit linearer Ansatzfunktion und einer Elementkantenlänge von $0,1 \cdot t = 1,2$ mm verwendet.

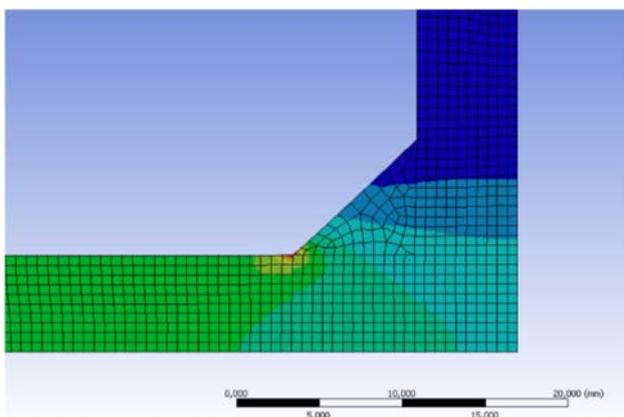


Abbildung 6-9: 2D Modell zur Bestimmung der Strukturspannungen

Figure 6-9: 2D FE-Model for determination of structural stress

6.3.3 Validierung des Strukturspannungsmodells

6.3.3 Validation of FE-Model for determination of structural stress

Die Validierung des FE-Modells erfolgt anhand eines Vergleichs der aus den Dehnungsmessungen in Abschnitt 6.2.5 berechneten Strukturspannungen mit den numerisch berechneten

Strukturspannungen. Hierbei ergeben sich vergleichbare Werte aus Messung und numerischer Berechnung. Die Abweichungen zwischen der numerischen Berechnung und der experimentellen Bestimmung der Dehnungen bewegen sich im Bereich von 0% bis 10%. Die mittlere Abweichung beträgt 4,99%. Diese Abweichung ist auf geometrische Messungenauigkeiten zurückzuführen, die aus Ungenauigkeiten bei der Handvermessung sowie bei der Applikation der DMS resultieren. Exemplarisch ist in Tabelle 37 die Auswertung für den höchstbeanspruchten Prüfkörper 2.2 mit den zugehörigen Abweichungen dargestellt.

Tabelle 37: Abweichungen zwischen DMS-Messung und numerischer Berechnung am Beispiel des Prüfkörpers 2.2

Table 37: Deviation of strain gauge measurement and numerical calculation by the example of specimen 2.2

Probe 2.2	FE ϵ [-]	Versuch ϵ [-]	FE σ [MPa]	Versuch σ [MPa]	Abweichung der Spannungen [%]
	$\epsilon = 1,67 \cdot \epsilon_{0,4t} - 0,67 \cdot \epsilon_{1,0t}$	$\epsilon = 1,67 \cdot \epsilon_{0,4t} - 0,67 \cdot \epsilon_{1,0t}$	$\sigma = E \epsilon$	$\sigma = E \epsilon$	
a1	0,001848	0,001944	388,106	408,329	-4,95
a2	0,001848	0,001950	388,106	409,482	-5,22
a3	0,001342	0,001258	281,746	264,234	6,63
a4	0,001342	0,001252	281,746	263,011	7,12

6.3.4 Kerbspannungskonzept

6.3.4 Notch stress approach

Die Kerbspannung ist die gesamte Spannung im Kerbgrund, wobei ein linear-elastisches Materialverhalten angenommen wird [51]. Die Kerbspannung entspricht demnach der Strukturspannung plus dem nichtlinearen Anteil der Spannungsspitze. Der Vorteil des Kerbspannungskonzepts gegenüber dem Strukturspannungskonzept liegt darin, dass die lokalen Geometrieparameter der Schweißnaht mit erfasst werden können. Dadurch können mit dem Kerbspannungskonzept präzise Vorhersagen des Anrissorts getroffen werden. Die Anwendung des Konzepts setzt die Kenntnis der örtlichen Kerbspannung voraus. Kann diese nicht durch Anwendung einfacher parametrisierter Formeln aus der Literatur ermittelt werden, ist diese anhand von FE-Berechnungen zu bestimmen. Dazu wird das Bauteil mit der lokalen Geometrie der Schweißnaht modelliert, wobei die Kerbe fiktiv ausgerundet wird (Referenzradius r_{ref}). Durch die fiktive Ausrundung der Kerbe wird die Mikrostützwirkung berücksichtigt. Die Anwendung des Kerbspannungskonzepts ist in den Empfehlungen des IIW [36], [51] ausführlich beschrieben. Es wird ein Referenzradius von $r_{ref} = 1$ mm verwendet und die maximale Hauptspannung für die Bewertung herangezogen. Das Konzept kann auf Schweißnahtübergänge und -wurzeln angewendet werden, siehe Abbildung 6-10. Die Kerbspannung σ_{en} ist mit der Nennspannung σ_{nom} über den Kerbfaktor K_t verknüpft, siehe Gl. (6.2).

$$\sigma_{en} = K_t \cdot \sigma_{nom} \tag{6.2}$$

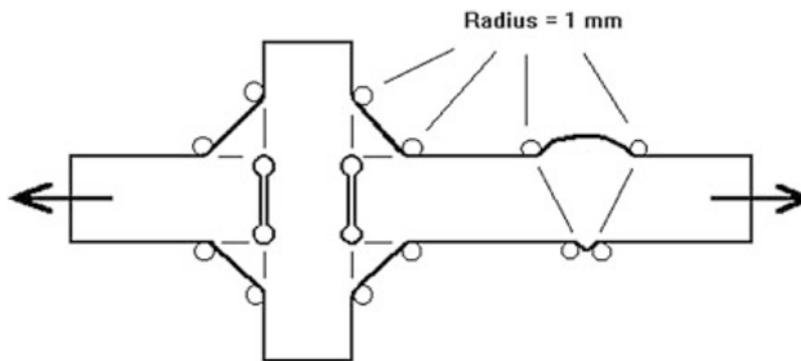


Abbildung 6-10: Fiktive Abrundung der Schweißnahtübergänge und Wurzeln nach [51]

Figure 6-10: Fictitious rounding of weld toes and roots according to [51]

6.3.5 Modellbildung für Kerbspannungskonzept

6.3.5 Numerical modelling for notch stress approach

Die numerische Berechnung der Kerbspannungen erfolgt mit dem FE-Programm ANSYS. Die Parameter der Basisgeometrie sind in Tabelle 36 dargestellt. Zur Berechnung der Kerbspannung wird ein zweidimensionales Modell unter Ausnutzung der Symmetrie im Hinblick auf die Durchführung von Parameterstudien erstellt. Der Modellaufbau ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Im Nahtübergangsbereich wird, basierend auf einer Konvergenzstudie, eine feine Vernetzung mit 62 Elementen im Abrundungsbereich gewählt. Es werden Scheibenelemente vom Typ PLANE 183 mit quadratischer Ansatzfunktion verwendet. Abbildung 6-12 zeigt die im Rahmen der nachfolgenden Parameterstudien verwendete Vernetzung des Abrundungsbereichs. Die Abrundung erfolgt sowohl für Proben im HFH-behandelten als auch für Proben im Zustand „wie geschweißt“ mit einem Abrundungsradius von $r_{ref} = 1 \text{ mm}$. Dies gewährleistet ein einheitliches Vorgehen sowie die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Die Gründe dafür werden unter anderem in [103] ausführlich erläutert.

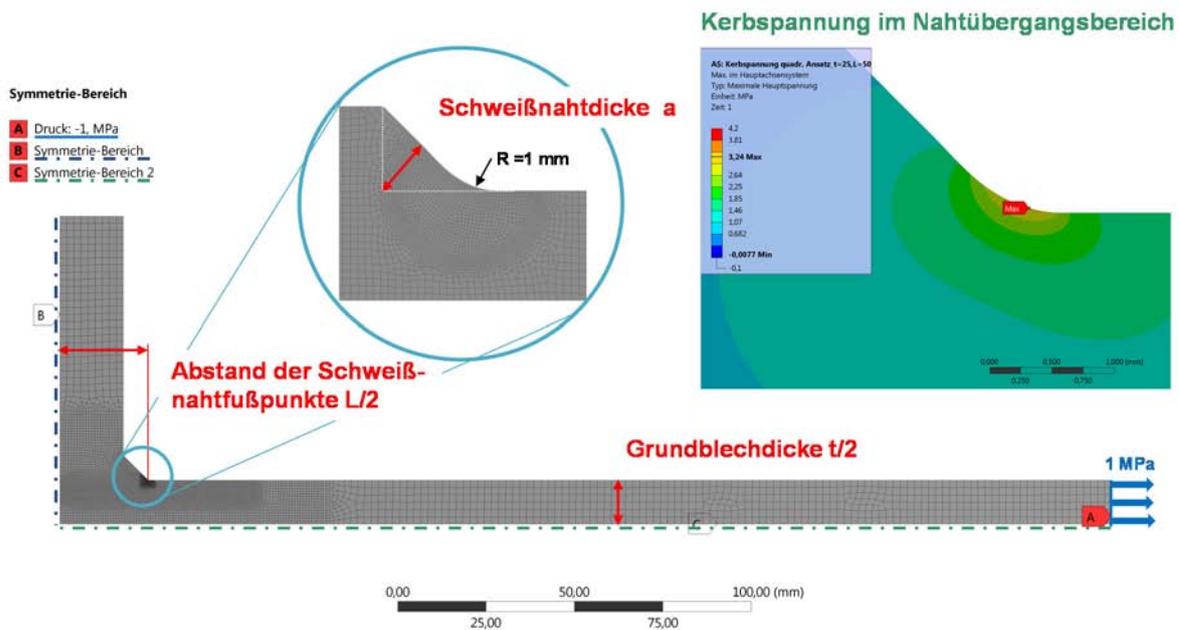


Abbildung 6-11: Kerbspannungsberechnung: 2D FE-Modell der Quersteife unter Ausnutzung der Symmetrie

Figure 6-11: Calculation of notch stress: 2D FE-Model of transverse attachment using symmetry conditions

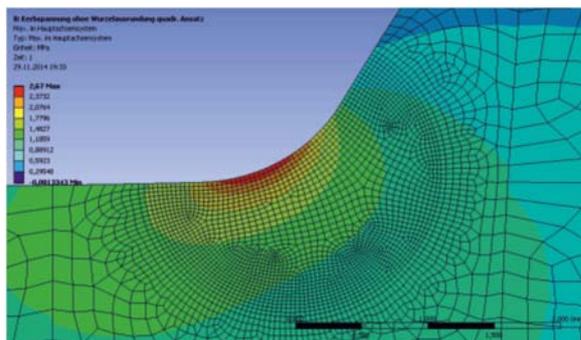


Abbildung 6-12: Kerbspannungsberechnung: Vernetzung im Ausrundungsbereich

Figure 6-12: Calculation of notch stress: mesh refinement at fictitious rounded weld toe

6.3.6 Numerische Berechnungen zur Quersteife

6.3.6 Numerical studies for transverse attachment

Mithilfe der zuvor beschriebenen FE-Modelle erfolgt die numerische Berechnung der Spannungskonzentrationsfaktoren (SCFs) sowie der Kerbfaktoren K_t . Dazu werden die Mittelwerte der gemessenen Geometrien verwendet, siehe Abschnitt 6.2.1. Betrachtet wird die Referenzserie HFH-behandelter Quersteifen aus Abbildung 3-17. Mit diesen Werten lassen sich die Ermüdungsfestigkeiten in Form des Kerbfalls bzw. der FAT-Klasse für die durchgeführten Ermüdungsversuche als Strukturspannungen und Kerbspannungen angeben, siehe Tabelle 38. Zum Vergleich werden die in den IIW-Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißnähte angegebenen Bemessungskerbfälle in Tabelle 38 angegeben. Die Abweichungen der in den IIW-Empfehlungen für HFH-behandelte Schweißnähte [68] angegebenen Werte fällt mit 11,5 % und 6,1 % gering aus. Es ist festzustellen, dass der Bemessungswert für die Anwendung des Strukturspannungskonzepts im vorliegenden Fall nicht konservativ ist.

Tabelle 38: Berechnete Ermüdungsfestigkeiten und Vergleich mit HFMI IIW Recommendations [68]

Table 38: Calculated fatigue strength and comparison with HFMI IIW Recommendations [68]

Spannungskonzept	Kerbfall (FAT-Klasse) Quersteife, HFH-behandelt, R=0,1 [N/mm ²]	FAT-Klasse nach HFMI IIW Recommendations [N/mm ²]	Abweichung [%]
Nennspannungskonzept	146	140	4,2
Strukturspannungskonzept (SCF = 1,16)	169	180	-6,1
Kerbspannungskonzept (K _t =2,79)	407	360	11,5

6.3.6.1 Einfluss der Blechdicke und des Abstands der Schweißnahtfußpunkte

Der Einfluss der Grundblechdicke t sowie des Abstands der Schweißnahtfußpunkte l bei Querstreifen wird anhand einer Parameterstudie numerisch untersucht, siehe Abbildung 6-13. Die Analyse wird anhand des Kerbspannungskonzepts unter Variation der Abmessungen t und l durchgeführt. In Abbildung 6-13 sind die Ergebnisse der Berechnungen grafisch dargestellt. Anhand der Berechnungen wird der in den Ermüdungsversuchen in Abschnitt 0 festgestellte Blechdickeneinfluss, bei dem höhere Ermüdungsfestigkeiten für Blechdicken $t < 25$ erreicht werden, bestätigt. Die Kerbfaktoren steigen mit zunehmender Blechdicke an und konvergieren ab einem Verhältnis von $l/t = 1$ gegen einen Maximalwert. Es zeigt sich außerdem, dass der Abstand der Schweißnahtfußpunkte l einen größeren Einfluss auf Höhe von K_t besitzt als die Blechdicke. Dies bestätigt zudem die Abhängigkeit des Kerbfalls im EC 3 [16] vom Abstand der Schweißnahtfußpunkte l . Demzufolge hat die Blechdicke t nur einen Einfluss auf K_t , wenn l kleiner als t ist.

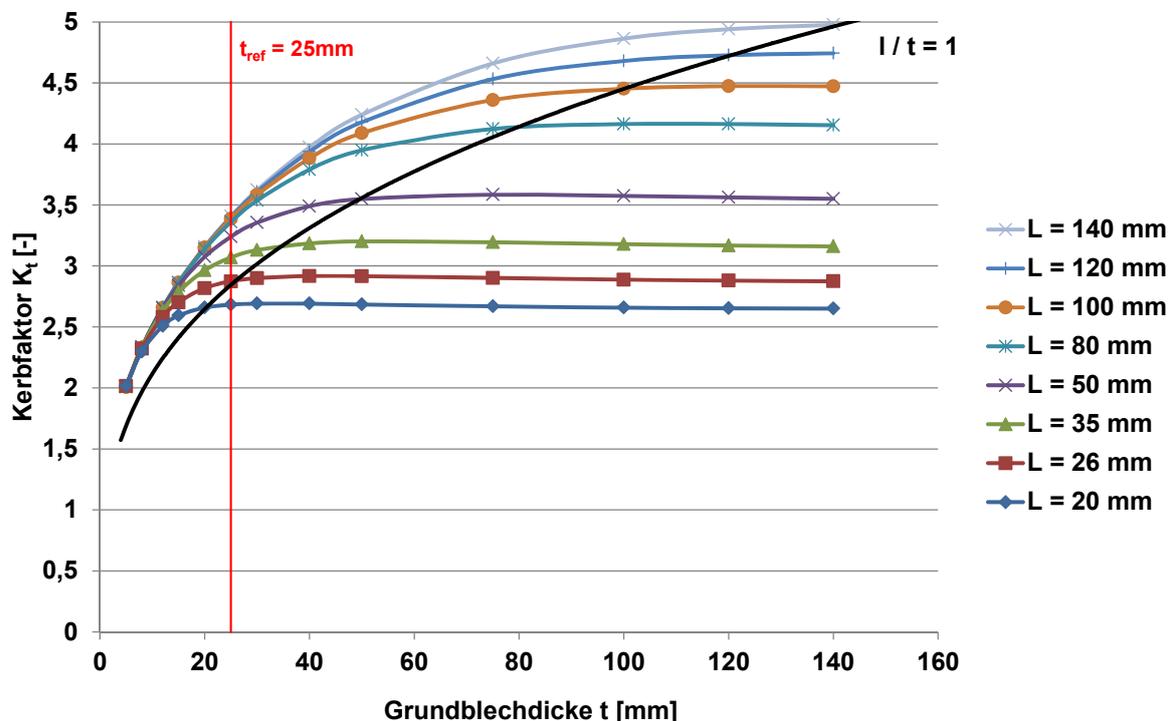


Abbildung 6-13: Einfluss Blechdicke t und Abstand der Schweißnahtfußpunkte auf Kerbfaktor K_t

Figure 6-13: Effect of plate thickness and distance of weld toes on notch factor K_t

Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen aus Abbildung 6-13 wird in Abbildung 6-14 ein Korrekturfaktor k_Q für die Ermüdungsfestigkeit des Details eingeführt. Dabei wird der Quotient

des Kerbfaktors $K_{t,ref,25mm}$ bei einer Blechdicke von $t = 25$ und dem jeweiligen Kerbfaktor gebildet. Anhand von Abbildung 6-14 wird die Geometrieabhängigkeit des Konstruktionsdetails, wie sie im EC 3 [16] enthalten ist, bestätigt. Der EC 3 Teil 1-9 sieht eine Kerbfalleinminderung um 11,3 % für den Abstand der Schweißnahtfußpunkte im Bereich von $50 < l \leq 80mm$ vor. Aus den FE-Berechnungen ergibt sich ebenfalls eine relative Abnahme von k_Q um 11,3%. Davon ausgehend, dass die Kerbfalleinordnung des EC 3 zutreffend ist, erfolgt die Übernahme dieser Geometrieabhängigkeit bezüglich dem Abstand der Schweißnahtfußpunkte in den Vorschlag der DAST-RiLi für HFH-behandelte Konstruktionsdetails auf Basis der numerischen Berechnungen.

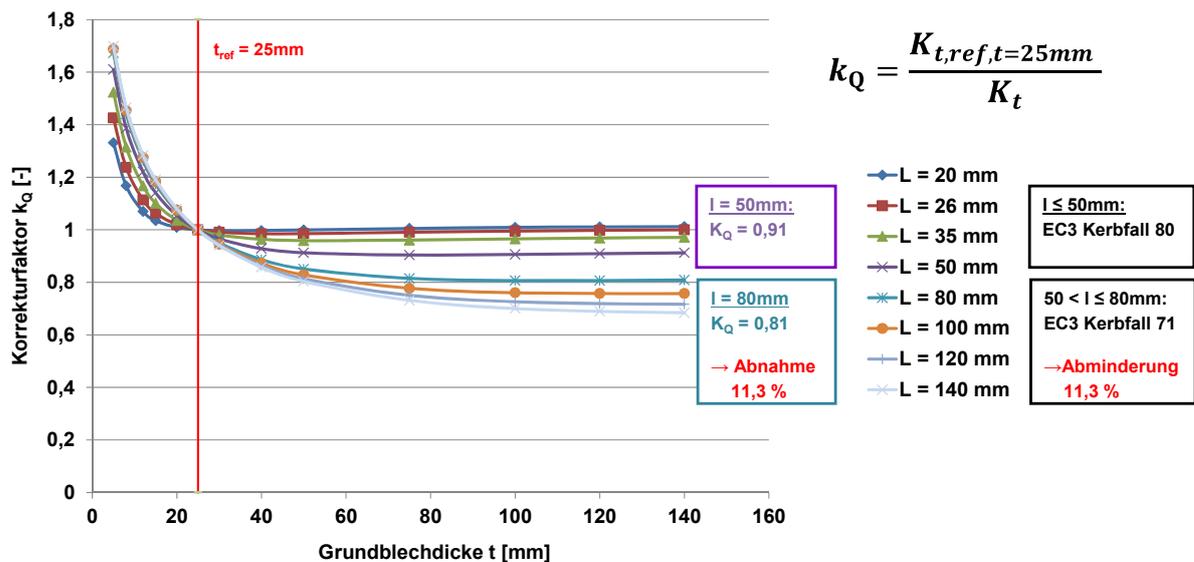


Abbildung 6-14: Kerbspannungsberechnung: Korrekturfaktor k_Q für Ermüdungsfestigkeit

Figure 6-14: Calculation of notch stress: correction factor k_Q for fatigue strength

6.3.6.2 Einfluss des Verzugs

Bei Zugbeanspruchung entstehen bei einem Prüfkörper mit Winkelverzug sekundäre Biegespannungen. Der Einfluss des Winkelverzugs wird nachfolgend unter Variation des Winkels in Schritten von $0,2^\circ$ an einem FE-Modell der halben Quersteife untersucht, siehe Abbildung 6-15. Die Symmetrieachse liegt in der Schwerelinie der Quersteifen. Die angesetzten Winkel sind somit gleichzusetzen mit einem identischen Verzug des Grundblechs auf beiden Seiten der Quersteife. Abbildung 6-15 zeigt ein Modell mit einem Verzug von $1,6^\circ$.

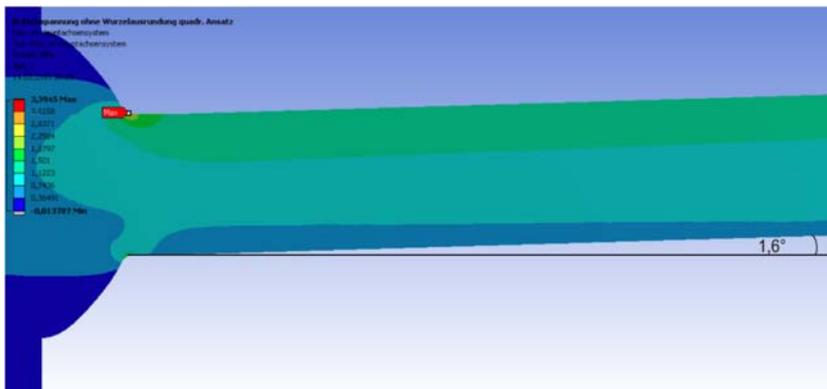


Abbildung 6-15: 2D-Modell mit einem exemplarischen Verzug von $1,6^\circ$
 Figure 6-15: Example of 2D FE-model with angular misalignment of $1,6^\circ$

Der Einfluss des Verzugs auf den Spannungskonzentrationsfaktor (SCF) sowie auf den Kerbfaktor K_t ist in Abbildung 6-16 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der vorliegende Verzug einen großen Einfluss auf die genannten Faktoren haben kann. Im Falle der vorliegenden Quersteifen ist der Einfluss mit einem maximalen (einseitigen) Verzug von knapp $0,4^\circ$ gering. Der Kerbfaktor erhöht sich um 7 %, während der SCF mit einer Erhöhung von 23 % sensibler reagiert. Im Mittel liegt bei den Prüfkörpern jedoch ein (einseitiger) Verzug von $0,18^\circ$ vor, siehe Abschnitt 6.2.3. Die geringen Verzüge der Prüfkörper erklären auch die geringen Streuungen der geprüften Referenzserien.

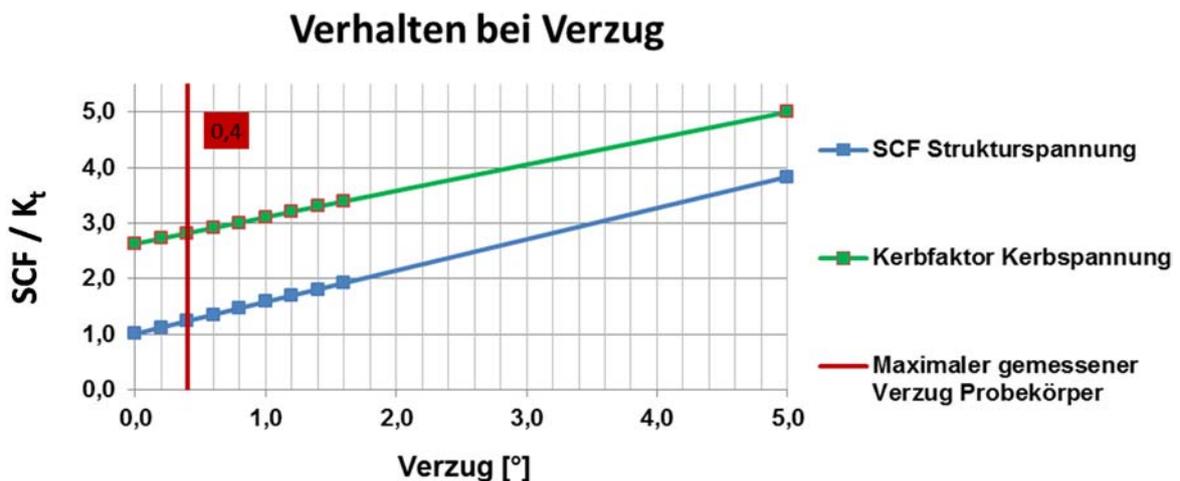


Abbildung 6-16: Einfluss des Verzugs auf SCF und Kerbfaktor K_t
 Figure 6-16: Effect of angular misalignment on SCF and notch factor K_t

6.3.6.3 Einfluss des Einbrandes

Die Einbrandtiefe zweier gegenüberliegender Schweißnähte der Quersteife wird unter Annahme von asymmetrischem und symmetrischem Einbrand numerisch untersucht. Die Analyse wird anhand des Kerbspannungskonzepts und in Schrittweiten von 1 mm durchgeführt. In Tabelle 39 ist exemplarisch der Einfluss auf den Kerbfaktor am Nahtübergang für einen symmetrischen Einbrand gegeben. Bei einem geringeren symmetrischen Einbrand wird kein signifikanter Einfluss auf den Kerbfaktor festgestellt. Dies gilt gleichermaßen für einen asymmetrischen

Einbrand. Eine Untersuchung anhand des Strukturspannungskonzepts lässt keinen Einfluss des Einbrands auf den SCF am Nahtübergang erkennen.

Tabelle 39: Kerbfaktoren K_t unter Variation des Einbrands

Table 39: Notch factor K_t for variation of horizontal penetration of weld

Symmetrischer Einbrand		
Einbrandtiefe linke Naht [mm]	Einbrandtiefe rechte Naht [mm]	Kerbfaktor K_t
6	6	2,521
5	5	2,540
4	4	2,524
3	3	2,527
2	2	2,519
1	1	2,518
0	0	2,554

7 Vorschlag für eine DAST-Richtlinie zur Berücksichtigung der HFH-Verfahren beim Ermüdungsnachweis

7 Proposal of a DAST-guideline to consider the HFMI-treatments for fatigue verification

Kurzfassung

Dieses Kapitel beschreibt die Anforderungen an ein Bemessungskonzept, das für eine zukünftige DAST-Richtlinie aus Sicht der Autoren geeignet ist, um die ermüdungsfestigkeitssteigernde Wirkung der HFH-Verfahren beim Ermüdungsnachweis zu berücksichtigen. Neben den Anforderungen werden die Grundlagen des Nennspannungskonzepts aus EN 1993-1-9, auf die das Bemessungskonzept aufbaut, erläutert.

Schlussendlich werden die Bemessungstabellen für die in den vorangehenden Kapiteln erläuterten Kerbdetails unter Berücksichtigung der jeweils beeinflussenden Faktoren vorgestellt.

Abstract

This chapter describes the requirements for a design concept, that in view of the authors is appropriate to consider the fatigue strengthening effects of HFMI-treatments within fatigue design. In addition to the requirements, the basis of the nominal stress concept according to EN 1993-1-9, which the design concepts builds upon, are explained.

Finally,, the design tables are given for the construction details that have been discussed within the project considering the effects that are respectively influencing.

7.1 Vorbemerkungen und Anforderung

7.1 *Preliminary remarks and requirements*

Im Folgenden werden aus Sicht der Autoren die Ziele für die im Entwurf befindliche DAST-Richtlinie erläutert.

Ziele:

- Klare Anwendungsgrenzen
- Sicherheit der Bemessung
- Anwenderfreundlichkeit
- Übersichtlichkeit
- Richtlinie für die Bemessung im Stahl- und Brückenbau, ggf. Kranbahnbau und Offshorebereich

Aus Sicht der Autoren haben die Kriterien Sicherheit und Zuverlässigkeit höchste Priorität für den Vorschlag eines Entwurfs für eine „DAST-Richtlinie für Höherfrequente Hämmerverfahren“. Deshalb haben sich die FSt. dazu entschieden, sich auf einige wesentliche Kerbdetails zu beschränken, die mit einer statistischen Sicherheit auf Grundlage eines ausreichenden Datenumfanges unter den bekannten kritischen Gesichtspunkten (Vorbelastung, Mittelspannung,...) überprüft werden konnten.

Ziel ist es, den Umfang der DAST-Richtlinie auf das Wesentliche zu reduzieren und Unklarheiten zu vermeiden. Dabei leistet eine tabellarische Aufbereitung der Verbesserungsfaktoren bzw. Kerbfälle zur Übersichtlichkeit und damit Anwenderfreundlichkeit ebenso einen Beitrag, wie die erläuternde Skizzen.

Der Umfang des Vorschlags wird gegenüber der IIW-Empfehlungen [68] wesentlich reduziert. Zur Reduzierung führen Definitionen und Skizzen. Es werden vor allem die Anwendungsgrenzen deutlich formuliert und hervorgehoben.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Gestaltung des Entwurfs ist die widerspruchsfreie Kopplung mit der gültigen europäischen Norm DIN EN 1993-1-9 [16].

7.2 Nachweis mit Nennspannungskonzept

7.2 *Verification based on nominal stress concept*

Der Nachweis mittels Nennspannungskonzepts nach Gleichung (7.1) bietet aufgrund seiner Einfachheit und Nachvollziehbarkeit das anwenderfreundlichste Nachweisverfahren nach DIN EN 1993-1-9 [16].

$$\gamma_{F,f} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_c / \gamma_{M,f} \quad (7.1)$$

Für den Nachweis mit geschweißten entsprechend HFH-nachbehandelten Schweißdetails sind die aus Tabelle 40 bis Tabelle 44 ermittelten Werte $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ in die Nachweisgleichung (7.1) für die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ auf der Widerstandsseite einzusetzen.

7.3 Aufbereitung der Ermüdungsfestigkeit für angewandte und erprobte geschweißte Konstruktionsdetails mit HFH-Behandlung in Tabellenform

7.3 *Concept of tables for applied and proven welded construction details treated by HFMI*

7.3.1 Erläuterung zur Herleitung der tabellierten Werte für die durch HFH-Anwendung verbesserten Ermüdungsfestigkeiten

7.3.1 *Explanation of derivation of tabulated values for HFMI-improved fatigue strengths*

Die statistische Auswertung und anschließende Evaluierung existierender Versuchsergebnisse an HFH-behandelten Konstruktionsdetails in Kapitel 0 ergab, dass sich die Ermüdungsfestigkeit für das Detail der unbelasteten Quersteife, des querbelasteten Stumpfstoßes und der unbelasteten Längssteife mittelspannungsabhängig verhält. Ebenso zeigte sich eine klare Steigerung der Ermüdungsfestigkeit bei erhöhten Streckgrenzen für alle Details.

Darauf aufbauend wurden die in den Kapiteln 5.2, 5.3, 5.4 statistisch ermittelten Ermüdungsfestigkeiten unter Annahme einer fixen Wöhlerlinienneigung ($m_{\text{HFH}} = 5$) in Tabellenform (siehe Tabelle 40, Tabelle 42, Tabelle 44) in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses R und der Streckgrenze $f_{y,\text{nom}}$ für das jeweilige Konstruktionsdetail aufgetragen (Werte in Klammern (*)). In Anlehnung an die Kerbfallkategorien in DIN EN 1993-1-9 [16] wurden die Festigkeiten auf die nächst kleinere Kerbkategorie reduziert (**fettgedruckte Werte** ohne Klammer). Lag der statistisch ermittelte Wert der verbesserten Ermüdungsfestigkeit deutlich über der höchsten Kerbfallkategorie 160, wurde dieser dennoch auf den Wert von 160 N/mm² beschränkt.

Da nicht für alle Einträge der Matrix statistisch ermittelte Ermüdungsfestigkeiten aus experimentell ermittelten Untersuchungen zur Verfügung standen ((k. DB.) – keine Datenbasis in Klammern), wurden Abschätzungen vornehmlich auf der sicheren Seite getroffen, falls der Einfluss aus Streckgrenze bzw. Spannungsverhältnis aus umliegenden Einträgen bekannt war. Die abgeschätzten verbesserten Ermüdungsfestigkeiten sind entsprechend durch Fußnoten gekennzeichnet.

Konnten keine Rückschlüsse für Felder ohne versuchstechnisch ermittelte Ermüdungsfestigkeit durch umliegende Tabellenwerte getroffen werden, wurde keine verbesserte Ermüdungsfestigkeit gegeben. Ebenso wurden hier die Einträge mit entsprechender Fußnoten versehen.

Die in den vorangegangenen Kapiteln 5.5.1.4 ermittelten Anwendungsgrenzen hinsichtlich der Beanspruchungshöhe wurden in Form von Fußnoten in Abhängigkeit des Konstruktionsdetails gegeben.

Ebenso finden geometrische Randbedingungen, beispielsweise für die unbelastete Quersteife aus Kapitel 6.3.6 über Fußnoten Eingang in die Tabelle 40, Tabelle 42 und Tabelle 44.

Unter Annahme einer fixen Neigung von $m_{\text{HFH}} = 5$ für HFH-nachbehandelte Kerbdetails und einer fixen Neigung von $m = 3$ geschweißter Kerbdetails, schneiden sich die beiden Festigkeitsgeraden im Wöhlerdiagramm, siehe [3]. So ergibt sich aufgrund des Schnittpunkts der zwei Geraden eine Mindestlastwechselzahl für die Effektivität der HFH-Nachbehandlung. Diese Mindestlastwechselzahl $N_{\text{min, HFH}}$ ist für das jeweilige nachbehandelte Detail tabelliert, siehe Tabelle 41, Tabelle 43 und Tabelle 45.

7.3.2 Anwendung des Bemessungskonzepts in tabellierter Form

7.3.2 Application of tabulated design concept

7.3.2.1 Allgemeines

In Abhängigkeit des Spannungsverhältnis R und der Streckgrenze $f_{y,nom}$ kann der entsprechende Wert für $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ bestimmt werden. Die verbesserten Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ für die jeweiligen HFH-nachbehandelten Details sind den Tabelle 40, Tabelle 42 und Tabelle 44 zu entnehmen.

Die Tabellen beziehen sich jeweils auf den in DIN EN 1993-1-9 [16] enthaltenen Basiskerbfall, siehe Abbildung 7-1, Abbildung 7-3 und Abbildung 7-5. Darüber hinaus gibt die Skizze in der jeweiligen Tabelle die direkte visuelle Zuordnung zum nachzubehandelnden Detail. Einschränkungen hinsichtlich der Ausführung des jeweiligen Konstruktionsdetails werden in Kapitel 7.4.2 gegeben. Außerdem werden in den Fußnoten der Tabellen Hinweise zu Abmessungen gegeben, falls diese einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben.

Eingangswert für die durch HFH-Nachbehandlung ansetzbare verbesserte Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ sind das vorliegende Konstruktionsdetail, die nominelle Streckgrenze $f_{y,nom}$ und das Spannungsverhältnis R . Liegen bei dem zu bemessenden Detail gegenüber den in der Tabelle vorgegebenen Spannungsverhältnissen R abweichende Werte vor, so muss die verbesserte Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ linear interpoliert werden.

Ob die ermittelte verbesserte Ermüdungsfestigkeit erreicht werden kann, ist durch die Kontrolle der Mindestlastwechselzahl $N_{min, HFH}$ anhand der Tabelle 41, Tabelle 43 und Tabelle 45 zu prüfen.

Neben den Mindestlastwechselzahlen sind die Anwendungsbedingungen hinsichtlich der Beanspruchung der Details entsprechend der Fußnoten der Tabellen zu berücksichtigen.

Die verbesserten Ermüdungsfestigkeiten in den Tabellen gelten für qualifizierte HFH-Verfahren. Als bereits ausreichend qualifiziert gelten die HFH-Verfahren UIT, HiFIT und PIT, da diese Verfahren den ausgewerteten Versuchsdaten zu Grunde liegen und wie bereits in Kapitel 2.3.5 beschrieben in ihrer Wirkungsweise und Effektivität vergleichbar sind.

7.3.2.2 Unbelastete Quersteife

Gemäß dem Basiskerbfall der unbelasteten Quersteife in DIN EN 1993-1-9 [16], siehe Abbildung 7-1 kann die durch HFH-Anwendung verbesserte Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ mit Hilfe der Tabelle 40 unter Berücksichtigung der Streckgrenze $f_{y, nom}$ sowie des Spannungsverhältnis R bestimmt werden.

Für die HFH-behandelte Quersteife konnte, ebenso wie im unbehandelten Zustand eine Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit durch den Abstand der Schweißnahtfußpunkte festgestellt werden. Infolgedessen gilt Tabelle 40 für den Basiskerbfall 80 nach DIN EN 1993-1-9 [16]. Liegt für den Abstand der Schweißnahtfußpunkte ein Wert $50 < l \leq 80$ mm vor, müssen die verbesserten Ermüdungsfestigkeiten um eine Kerbfallklasse reduziert werden.

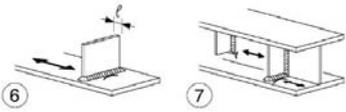
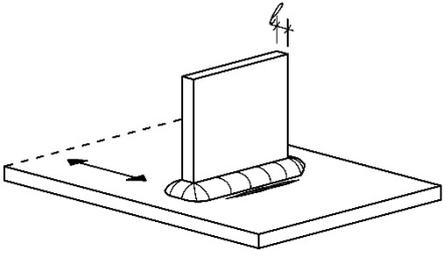
80	$l \leq 50$ mm		<u>Quersteifen:</u> 6) Quersteifen auf Blechen 7) Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Blechträgern.	<u>Kerbfälle 6) und 7):</u> Die Schweißnahtenden sind sorgfältig zu schleifen, um Einbrandkerben zu entfernen.
----	----------------	---	--	---

Abbildung 7-1: Auszug aus DIN EN 1993-1-9 [16] Konstruktionsdetail unbelastete Quersteife

Figure 7-1: Excerpt of DIN EN 1993-1-9 [16] construction detail of unloaded transverse stiffener

Tabelle 40: Vorschlag für tabellarische Ermittlung der durch qualifizierte HFH-Verfahren verbesserten Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ für das Nennspannungskonzept für die unbelastete Quersteife

Table 40: Proposal for tabular determination of the fatigue strength improved by qualified HFMI-treatments $\Delta\sigma_{c, imp, HFMI}$ for the nominal stress concept for unloaded transverse stiffener

	Durch qualifizierte HFH Verfahren verbesserte Ermüdungsfestigkeit für das Nennspannungskonzept ^{1.), 3.), 4.)}		
	$\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ [N/mm ²]		
	R [-] ^{2.)}		
Stahlgüte nach DIN EN 10025	-1,0	0,1	0,5
S235 $\leq f_y < S355$	100 (k. DB.)	100 (103,9)	80 (k. DB.)
S355 $\leq f_y < S550$	160 (234,3)	140 (156,7 // 142,0)	90 (90,5)
S550 $\leq f_y \leq S700$	160 (305,7)	160 (188,2)	125 (134,7)

1.) Tabelle gilt für $l \leq 50$ mm; falls $50 < l \leq 80$ mm, muss $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ um eine Kerbfallklasse abgemindert werden.

2.) Für abweichende Spannungsverhältnisse R muss $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ linear interpoliert werden

3.) Anwendungsbereich begrenzt auf: $\Delta\sigma \leq 1,5 f_y$

4.) Anwendungsbereich begrenzt auf: $-0,8 f_y < \sigma \leq f_y$

Die Anwendungsgrenzen hinsichtlich einer Mindestlastwechselzahl ergibt sich in Abbildung 7-2 durch den Schnittpunkt der Geradengleichungen der durch HFH-verbesserten (durchgezogene Linien) und unbelasteten, also ursprünglichen Ermüdungsfestigkeit nach DIN EN 1993-1-9 [16]. Die berechneten Mindestlastwechselzahlen können für den Fall der Quersteife Tabelle 41 entnommen werden. Details zum Vorgehen können [3] entnommen werden.

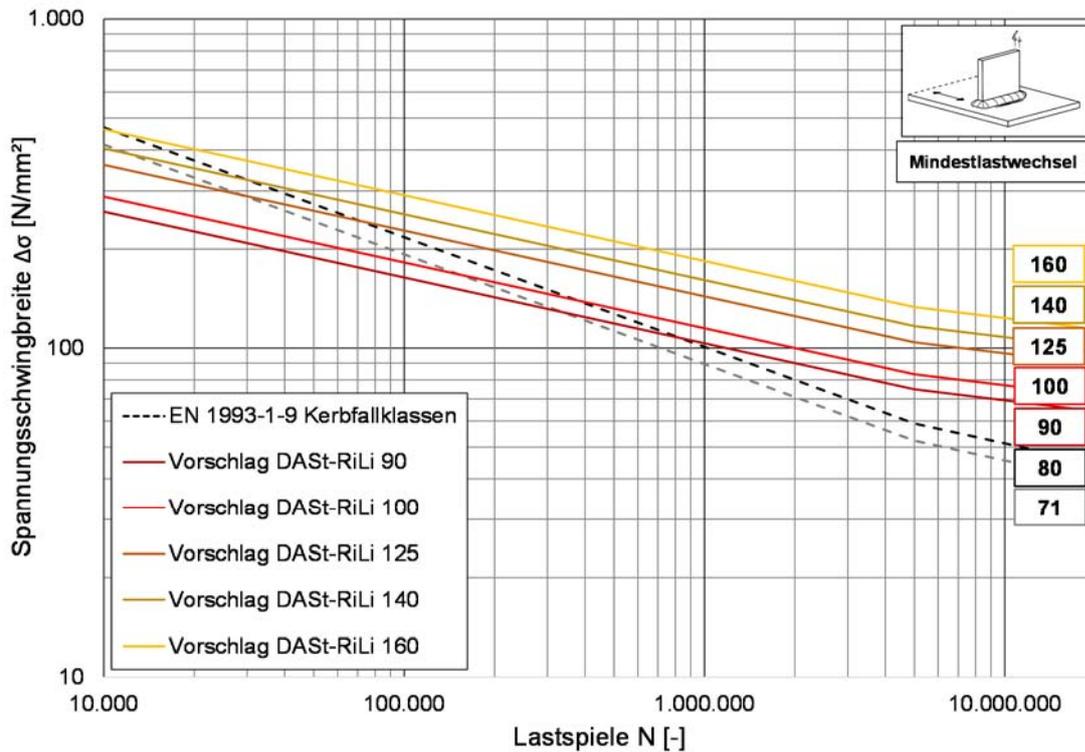


Abbildung 7-2: Darstellung der Schnittpunkte der verbesserten mit den ursprünglichen Kerbfallgeraden für die unbelastete Quersteife [3]

Figure 7-2: Visualization of intersections of improved with original detail category lines for unloaded transverse stiffener [3]

Tabelle 41: Mindestlastwechselzahlen entsprechend des DAST-RiLi-Bemessungsvorschlags aus Tabelle 40 der unbelasteten Quersteife [3]

Table 41: Minimum numbers of load cycles according to DAST-Guideline design proposal from Table 40 of unloaded transverse stiffener [3]

Ursprüngliche Kerbfallklasse	Verbesserte Kerbfallklasse	Mindestlastwechselzahl	Ursprüngliche Kerbfallklasse	Verbesserte Kerbfallklasse	Mindestlastwechselzahl
$\Delta\sigma_c$, EC3-1-9 [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{c, imp}$, HFH [N/mm ²]	N_{min} , HFH [-]	$\Delta\sigma_c$, EC3-1-9 [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{c, imp}$, HFH [N/mm ²]	N_{min} , HFH [-]
71	90	337.792	80	90	826.575
71	100	153.246	80	100	374.992
71	112	65.520	80	112	160.325
71	125	28.750	80	125	70.351
71	140	12.288	80	140	30.069
71	160	4.514	80	160	11.046

7.3.2.3 Querbelteter Stumpfstoß

Für den querbelteten Stumpfstoß nach DIN EN 1993-1-9 [16], siehe Abbildung 7-3 kann in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses R und der Streckgrenze f_y die durch HFH-Anwendung verbesserte Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,imp,HFH}$ aus Tabelle 42 abgeleitet. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass ein Blechdickeneffekt, zur Abminderung der Ermüdungsfestigkeit bei Blechdicken $t > 25$ mm ebenso wie im unbehandelten Zustand berücksichtigt werden muss.

90	Blechdickenabhängigkeit für $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0,2}$		<p>5) Querstöße von Blechen oder Flachstähen.</p> <p>6) Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten ohne Freischnitte.</p> <p>7) Querstöße von Blechen oder Flachstähen, abgeschragt in Breite oder Dicke mit einer Neigung $\leq 1/4$. Der Übergang muss kerbfrei ausgeführt werden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Die Nahtüberhöhung muss $\leq 10\%$ der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden. - Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen. Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen. - Beidseitige Schweißung mit ZFP. <p><u>Kerbfälle 5 und 7:</u> Die Nähte sind in Wannenlage zu schweißen.</p>
----	--	--	--	---

Abbildung 7-3: Auszug aus DIN EN 1993-1-9 [16] Konstruktionsdetail querbeanspruchter Stumpfstoß
Figure 7-3: Excerpt of DIN EN 1993-1-9 [16] construction detail of transverse loaded butt weld

Tabelle 42: Vorschlag für tabellarische Ermittlung der durch qualifizierte HFH-Verfahren verbesserten Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,imp,HFH}$ für das Nennspannungskonzept für den querbelteten Stumpfstoß

Table 42: Proposal for tabular determination of the fatigue strength improved by qualified HFMI-treatments $\Delta\sigma_{c,imp,HFMI}$ for the nominal stress concept for transverse loaded butt joint

	Durch qualifizierte HFH Verfahren verbesserte Ermüdungsfestigkeit für das Nennspannungskonzept ^{3.), 4.), 5.)}		
	$\Delta\sigma_{c,imp,HFH}$ [N/mm ²]		
	R [-] ^{2.)}		
Stahlgüte nach DIN EN 10025	-1,0	0,1	0,5
S235 $\leq f_y < S355$	1.)	1.)	1.)
S355 $\leq f_y < S550$	160 (k.DB)	140 (158,3 // 145,5)	100 (107,6)
S550 $\leq f_y \leq S700$	160 (385,8)	160 (195)	140 (159,3)

- 1.) Keine verbesserte Ermüdungsfestigkeit, da mangelnde Datenbasis
- 2.) Für abweichende Spannungsverhältnisse R muss $\Delta\sigma_{c,imp,HFH}$ linear interpoliert werden
- 3.) Anwendungsbereich begrenzt auf: $\Delta\sigma \leq 1,5 f_y$
- 4.) Anwendungsbereich begrenzt auf: $-0,8 f_y < \sigma \leq f_y$
- 5.) Falls $t > 25$ mm, muss $\Delta\sigma_{c,imp,HFH}$ mittels $k_s = \left(\frac{25}{t}\right)^{0,2}$ abgemindert werden.

Ebenso können die Mindestlastwechselzahlen für das Detail des Stumpfstoßes für die jeweilige verbesserte Kerbfallgerade grafisch aus Abbildung 7-4 und absolut als Zahlenwert aus Tabelle 43 bestimmt werden. Details zum Vorgehen können [3] entnommen werden.

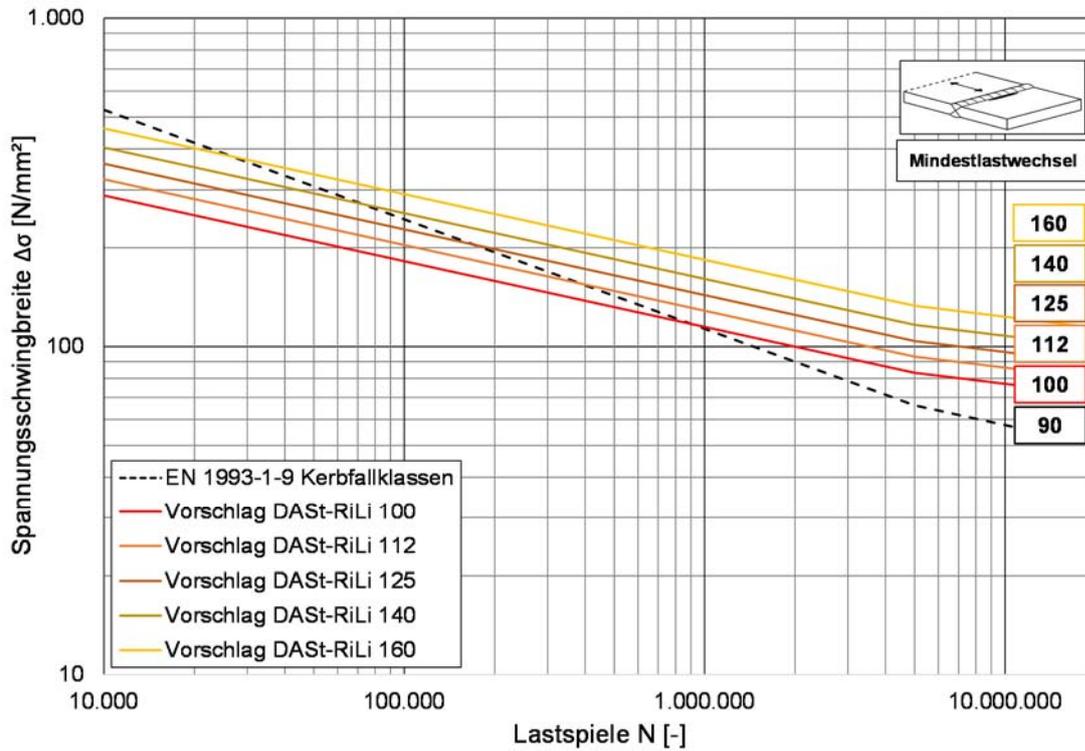


Abbildung 7-4: Darstellung der Schnittpunkte der verbesserten mit den ursprünglichen Kerbfallgeraden für den querbelasteten Stumpfstoß [3]

Figure 7-4: Visualization of intersections of improved with original detail category lines for butt weld [3]

Tabelle 43: Mindestlastwechselzahlen entsprechend des DAST-RiLi-Bemessungsvorschlags aus Tabelle 42 für querbelasteten Stumpfstoß [3]

Table 43: Minimum numbers of load cycles according to DAST-Guideline design proposal from Table 42 for transverse loaded butt weld joint [3]

Ursprüngliche Kerbfallklasse	Verbesserte Kerbfallklasse	Mindestlastwechselzahl
$\Delta\sigma_c$, EC3-1-9 [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{c, imp}$, HFH [N/mm ²]	N_{min} , HFH [-]
90	100	907.197
90	112	387.866
90	125	170.196
90	140	72.743
90	160	26.722

7.3.2.4 Unbelastete Längssteife

Gemäß dem Basiskerbfall der unbelasteten Längssteife in DIN EN 1993-1-9 [16], siehe Abbildung 7-5 kann die durch HFH-Anwendung verbesserte Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ mit Hilfe der Tabelle 44 unter Berücksichtigung der Streckgrenze $f_{y, nom}$ sowie des Spannungsverhältnis R bestimmt werden.

Für die HFH-behandelte Längssteife konnte aufgrund der geringen experimentellen Untersuchungen unter variierender Steifenabmessung kaum Aussagen zur Ermüdungsfestigkeitsverbesserung von kurzen Steifenlängen getroffen werden, so dass sich die Tabelle 44 am Basiskerbfall 56 bei Steifenlänge $L > 100$ mm bezieht. Die Ermüdungsfestigkeiten gelten in gleicher Weise für kürzere Steifenlängen $L \leq 100$ mm.

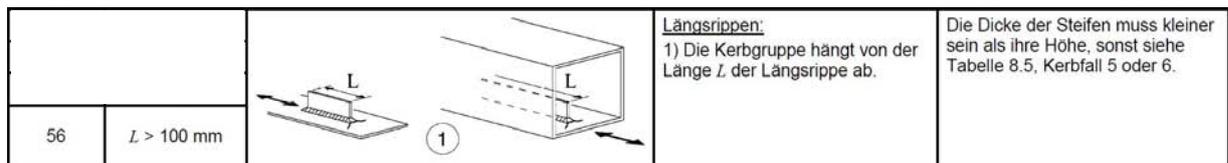
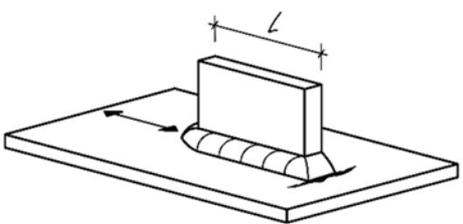


Abbildung 7-5: Auszug aus DIN EN 1993-1-9 [16] Konstruktionsdetail unbelastete Längssteife

Figure 7-5: Excerpt of DIN EN 1993-1-9 [16] construction detail of unloaded longitudinal stiffener

Tabelle 44: Vorschlag für tabellarische Ermittlung der durch qualifizierte HFH-Verfahren verbesserten Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ für das Nennspannungskonzept für die unbelastete Längssteife

Table 44: Proposal for tabular determination of the fatigue strength improved by qualified HFMI-treatments $\Delta\sigma_{c, imp, HFMI}$ for the nominal stress concept for unloaded longitudinal stiffener

	Durch qualifizierte HFH Verfahren verbesserte Ermüdungsfestigkeit für das Nennspannungskonzept ^{1.), 4.), 5.)}		
	$\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ [N/mm ²]		
	R [-] ^{3.)}		
Stahlgüte nach DIN EN 10025	-1,0	0,1	0,5
S235 ≤ f_y < S355	2.)	2.)	2.)
S355 ≤ f_y < S550	112	112 (121,6)	80
S550 ≤ f_y ≤ S700	125 (197,6)	125 (148,8)	80 (89,9)

1.) Tabelle gilt für Basiskerbfall 56, sowie für alle weiteren Kerbfälle mit kürzer werdender Steifenlänge; aufgrund mangelnder Datenbasis für kürzere Steifengeometrien, konnten keine verbesserte Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ für diese Fälle bestimmt werden, weshalb auf der sicheren Seite liegend Tabelle 44 auch für kürzere Steifenlängen anzuwenden ist.

2.) Keine verbesserte Ermüdungsfestigkeit, da mangelnde Datenbasis

3.) Für abweichende Spannungsverhältnisse R muss $\Delta\sigma_{c, imp, HFH}$ linear interpoliert werden

4.) Anwendungsbereich begrenzt auf: $\Delta\sigma \leq 1,5 f_y$

5.) Anwendungsbereich begrenzt auf: $-0,8 f_y < \sigma \leq f_y$

Die Mindestlastwechselzahlen $N_{\min, HFH}$ für das Detail der unbelasteten Längssteife für die jeweilige verbesserte Kerbfallgerade können grafisch aus Abbildung 7-4 und absolut als Zahlenwert aus Tabelle 43 bestimmt werden. Details zum Vorgehen können [3] entnommen werden.

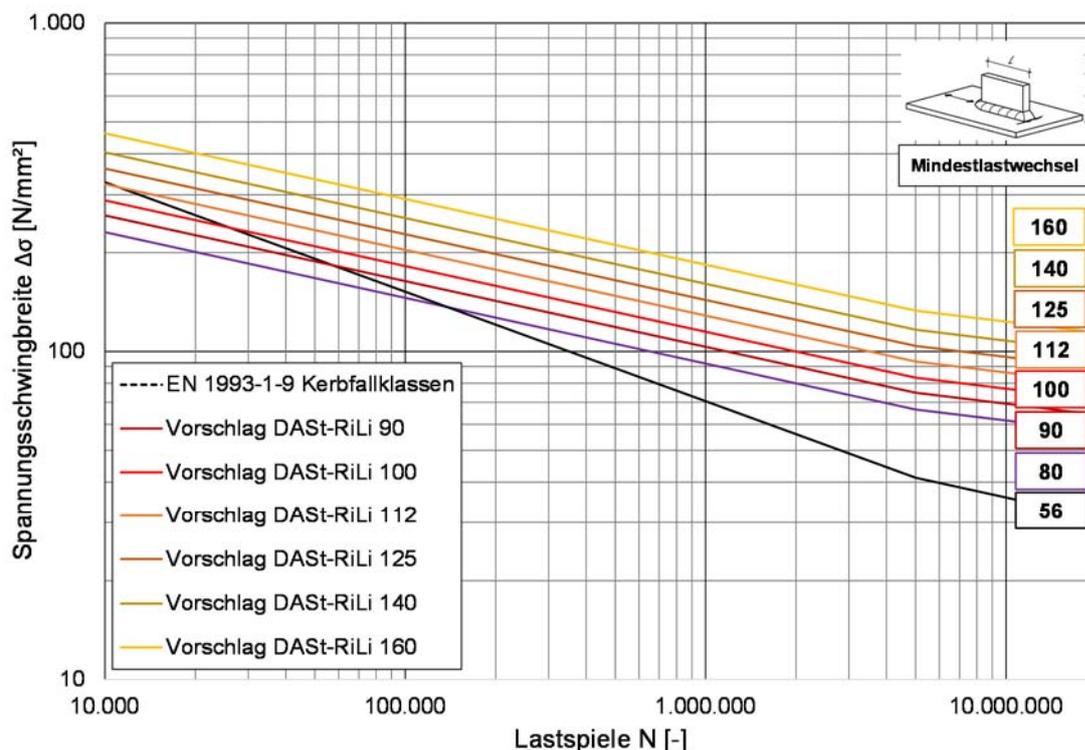


Abbildung 7-6: Darstellung der Schnittpunkte der verbesserten mit den ursprünglichen Kerbfallgeraden für die unbelastete Längssteife [3]

Figure 7-6: Visualization of intersections of improved with original detail category lines for unloaded longitudinal attachment [3]

Tabelle 45: Mindestlastwechselzahlen entsprechend des DAST-RiLi-Bemessungsvorschlags aus Tabelle 44 der unbelasteten Längssteife [3]

Table 45: Minimum numbers of load cycles according to DAST-Guideline design proposal from Table 44 of unloaded longitudinal stiffener [3]

Ursprüngliche Kerbfallklasse	Verbesserte Kerbfallklasse	Mindestlastwechselzahl
$\Delta\sigma_c, EC3-1-9$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_c, imp, HFH$ [N/mm ²]	$N_{\min, HFH}$ [-]
56	80	137.777
56	90	56.971
56	100	25.846
56	112	11.050
56	125	4.849
56	140	2.072

7.4 Voraussetzungen in Abhängigkeit der Ausführung der Schweißnaht, für die Anwendung der Tabelle

7.4 Requirements depending on the execution of weld and application of tables

7.4.1 Anforderungen an die zu behandelnde Schweißnaht

7.4.1 Requirements for the HFMI-treated weld

Prinzipiell sind für ermüdungsbeanspruchte Konstruktionen höhere Schweißnahtqualitäten gefordert als für vorwiegend ruhend beanspruchte Konstruktionen, denn Schweißnahtungängen können die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Konstruktionen erheblich herabsetzen. Deshalb wird für Stahl- und Verbundbrücken beispielweise eine Ausführungsqualität der Schweißnähte mit Anforderungen nach Bewertungsgruppe B gemäß DIN EN ISO 1578 [25] verlangt.

Dies gilt auch für die Anwendung der HFH-Verfahren. Vor allem durch Schweißnahtfehler im Inneren können die in Tabelle 40 bis Tabelle 44 angegebenen Festigkeiten nicht erreicht werden, da die Schweißnahtfehler zu frühzeitigem Versagen im Inneren, also zu einem lokal verlagerten Versagen führen.

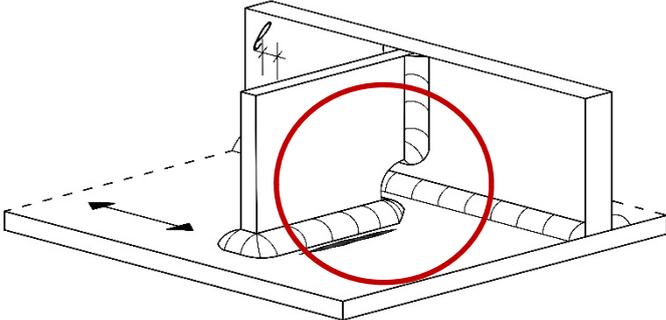
7.4.2 Definition der geeigneten Konstruktionsdetails und Variationen

7.4.2 Definition of appropriate construction details and variants

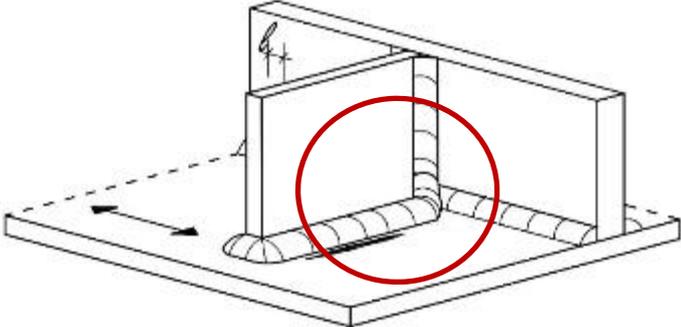
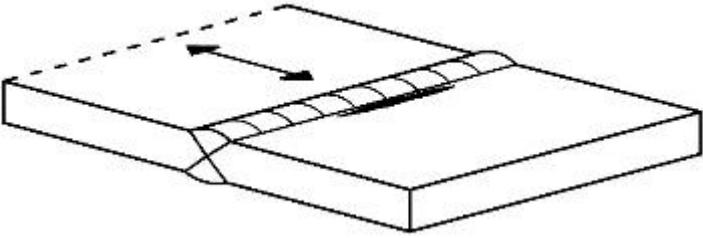
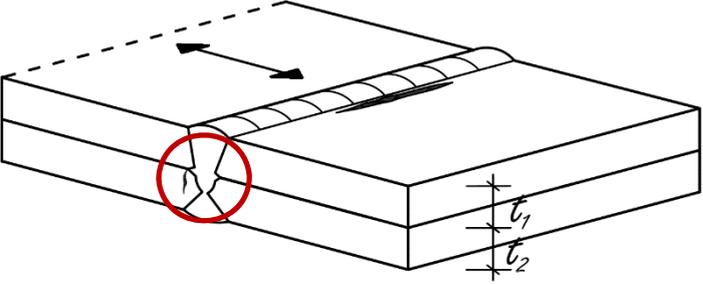
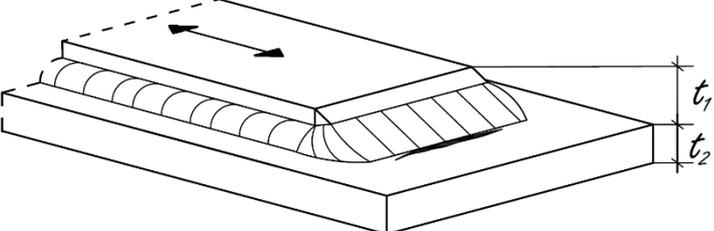
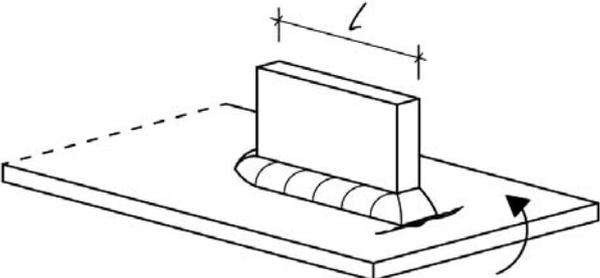
Die Eignung verschiedener Kerbdetails, in Kombination mit deren Beanspruchungsrichtung für die Anwendung der HFH-Verfahren wurde bereits in Kapitel 2.1 mit Abbildung 2-1 bzw. Abbildung 2-2 dargestellt. Anhand der abstrahierten Skizzen und Vereinfachungen werden jedoch die in DIN EN 1993-1-9 [16] gegebenen Kerbdetails im Folgenden etwas differenzierter betrachtet und geeignete den ungeeigneten Ausführungsvarianten gegenübergestellt. Vor allem in der Brückenbaupraxis typische geschweißte Details wurden in [3] hinsichtlich ihrer HFH-Eignung betrachtet und fließen in die Abgrenzung in Tabelle 46 mit ein.

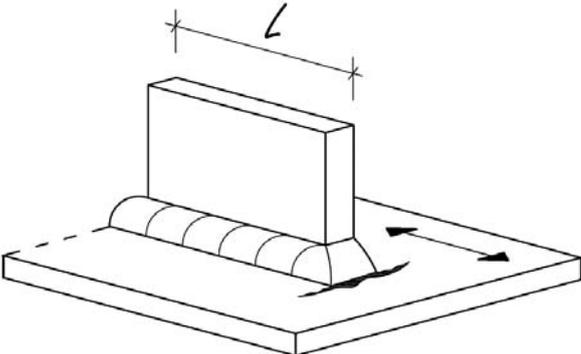
Tabelle 46: Abgrenzung ungeeigneter Ausführungsvarianten prinzipiell geeigneter Kerbdetails

Table 46: Separation of inappropriate construction variants from appropriate construction details

Eignung	Skizze	Beschreibung
		<p>Eingeschweißte Quersteife mit kreisrundem oder schrägem Freischnitt</p> <p>Gefahr der ungenügenden Nachbehandlung im Bereich des Freischnitts</p>

Vorschlag für eine DAST-Richtlinie zur Berücksichtigung der HFH-Verfahren beim Ermüdungsnachweis

✓		<p>Eingeschweißte eingespasste Quersteife ohne Freischnitt</p>
✓		<p>Querbelasteter Stumpfstoß</p>
✗		<p>Querbelasteter Lamellenstoß aus 2 Blechpaketen mit Stirnfugennaht Gefahr des Wurzelriss an Stirnfugennaht</p>
✗		<p>Gurtlamellenende Erhöhte Gefahr des Wurzelrisses</p>
✗		<p>Unbelastete Längssteife mit biegebeanspruchtem Basisblech Erhöhte Gefahr des Wurzelrisses</p>

		<p>Unbelastete Längssteife mit unvollständiger Umschweißung der Längssteife</p> <p>Erhöhte Gefahr des Wurzelrisses</p>
---	--	---

Unbelastete Quersteife. Im Laufe der Dimensionierung der Trägerversuche stellte sich die Frage nach der Geometrie der Quersteifen, siehe Kapitel 3.4.5.3, bzw. [3]. Dabei stellte sich heraus, dass die jeweils umlaufenden Schweißnähte einer eingeschweißten Quersteife mit Freischnitt für ein Nachbehandlungsgerät teilweise nicht zugänglich sind. So konnte am Beispiel eines Freischnitt mit $r = 30$ mm gezeigt werden, dass die stirnseitig zum Steg parallel verlaufende Naht aus geometrischen Gründen nicht nachbehandelt werden kann. Eine Nachbehandlung kann in diesem Fall rein durch die Geometrie eines kreisrunden Freischnitts nicht sichergestellt werden und wird deshalb als nicht geeignet deklariert, siehe Tabelle 46. Dasselbe gilt für Freischnitte die schräg ausgeführt sind, siehe [3].

Querbelasteter Stumpfstoß. Untersuchungen am Institut für Konstruktion und Entwurf am Lamellenstoß [62] haben gezeigt, dass der Rissausgang bei dem anspruchsvollen Schweißdetail sowohl von den Nahtübergängen auf Unter- und Oberseite der Blechpakete initiiert werden als auch von der Wurzel der Stirnfugennaht. In diesem Fall könnte eine HFH-Nachbehandlung zwar die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnahtübergänge verbessern, jedoch nicht, die kritische Kerbe an der Wurzel der Stirnfugennaht. Deshalb ist der Ansatz einer gesteigerten Ermüdungsfestigkeit nach 7.2 bzw. 7.3 für das Detail des Lamellenstoßes als Abwandlung des querbelasteten Stumpfstoßes nicht zuverlässig erreichbar.

Gurtlamellenende. Auch beim Detail des Gurtlamellenendes nach DIN EN 1993-1-9 [16] konkurriert das Nahtübergangsversagen mit dem Wurzelversagen, so dass nach einer HFH-Nachbehandlung am Nahtübergang das Wurzelversagen maßgebend werden kann, siehe [2]. Somit führt eine Nachbehandlung am Schweißnahtübergang des Gurtlamellenendes zwar zur Ermüdungsfestigkeitssteigerung des Nahtübergangs nach Tabelle 42, aber ein Versagen der unbehandelten Wurzel kann zu einem verfrühten Versagen des gesamten Details führen. Die Tabelle 42 kann deshalb nicht für nachbehandelte Gurtlamellenenden übernommen werden.

Unbelastete Längssteife. Die unbelastete Längssteife ist, wie bereits in Kapitel 5.4 mehrfach dargestellt, gegenüber anderen Kerbdetails, sehr anfällig für Wurzelversagen. Da sich die Nahtwurzel der Längssteife im Inneren des Bauteils befindet, kann eine Nachbehandlung hier nicht stattfinden, was die Verbesserung des gesamten Ermüdungsdetails stark einschränkt.

Darüber hinaus haben experimentelle Untersuchungen an der HFH-behandelten Längssteife in [5] deutlich gezeigt, dass unter Biegebeanspruchung keine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit erzeugt werden kann. Aus diesem Grund ist für die unbelastete Längssteife, deren Grundblech auf Biegung beansprucht wird, eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit nicht zuverlässig erreichbar, siehe eine detailliertere Ausführung in [3].

7.4.3 Untersuchungen zum Wurzelriss der unbelasteten Quersteife (Dürr [30], S.158)

7.4.3 Investigations on root failure for unloaded transverse attachment

Mithilfe numerischer Kerbspannungsbetrachtungen zur unbelasteten Quersteife wurden von Dürr [30] geometrische Faktoren und deren Auswirkung auf Kerbfaktoren K_t untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass der geometrische Parameter, der ein Wurzelversagen am ehesten begünstigt, die Schweißnahtdicke a darstellt. Je kleiner die Schweißnahtdicke a , desto größer wird der Kerbfaktor K_t im Bereich der unbehandelten Schweißnahtwurzel.

Das Wurzelversagen der betrachteten WIG-nachbehandelten Untersuchungen in Minner [70] ist jedoch nach Meinung von Minner eindeutig auf Schweißnahtinnenfehler zurückzuführen, siehe [3]. Die Ableitung eines Wurzelversagenskriteriums aus den Untersuchungen sind deshalb als eher konservativ einzuordnen, da sie bereits Schweißnahtfehler berücksichtigen, die durch die Vorgabe der Bewertungsgruppe B nach DIN EN 1578 [25] in Abschnitt 7.4.1 nicht zulässig sind.

Ein Wurzelversagen an HFH-behandelten Schweißnähten der Quersteife wird in diesem Zusammenhang als sehr unwahrscheinlich beurteilt. Den Autoren des Schlussberichts sind keine Versuchsserien bekannt, bei denen ein Wurzelversagen am Detail der unbelasteten Quersteife im HFH-behandelten Zustand herbeigeführt wurde. Die Verlagerung des Versagens zum Grundmaterial hin war jedoch vor allem an höherfesten Probekörpern häufiger vorzufinden.

7.4.4 Schweißnahtwurzelversagen der unbelasteten Längssteife

7.4.4 Weld root failure for unloaded longitudinal attachment

Das Konstruktionsdetail der unbelasteten Längssteife zeigt hinsichtlich eines möglichen Wurzelversagens der drei betrachteten Konstruktionsdetails das kritischste Verhalten. Bei der Versuchsdurchführung der Längssteifenprobekörper aus S690 in Refresh [90] hat sich im HFH-nachbehandelten Zustand vermehrt ein Wurzelrissversagen eingestellt. Da alle diese Versuchsdaten in die statistische Auswertung zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit der HFH-behandelten Längssteife mit aufgenommen wurde, ist dieser kritische Effekt in der in Tabelle 44 gegebenen verbesserten Ermüdungsfestigkeit durchaus zu einem gewissen Anteil (siehe Tabelle 30 Kennzeichnung mit „*“) berücksichtigt.

Es sei drauf hingewiesen, dass Wurzelversagen nur für Probekörper aus Stahlgüte S690 auftraten. Die Ermüdungsfestigkeit des Wurzelversagens der Längssteife scheint werkstoffunabhängig zu sein und liegt mindestens über dem der verbesserten Ermüdungsfestigkeit für S355 $\Delta\sigma_{c,imp,HFH} = 112 \text{ N/mm}^2$.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8 *Conclusions and outlook*

8.1 Zusammenfassung der Untersuchungen

8.1 *Conclusions of investigations*

Experimentelle und numerische sowie analytische Untersuchungen zur Wirksamkeit und Effektivität der Höherfrequenten Hämmerverfahren liegen auf nationaler, sowie internationaler Ebene in großer Menge vor. Trotz der umfassenden Forschungstätigkeiten im Bereich der HFH-Verfahren konnte bisher keine bauaufsichtlich eingeführte Richtlinie zur Verfügung gestellt werden, so dass sich die Anwendung der HFH-Verfahren im Bauwesen immer noch auf wenige Bauwerke beschränkt, bei denen eine Zustimmung im Einzelfall erteilt wurde.

Mit dem Ziel, einen Entwurf für eine DASt-Richtlinie zu erstellen, die die Berücksichtigung der Anwendung der HFH-Verfahren bei der Ermüdungsbemessung zulässt, wurden im Rahmen dieses Projekts in einem ersten Schritt offene Fragestellungen identifiziert. Dazu wurden sämtliche verfügbare Literaturstellen auf relevante Ermüdungsversuche unter HFH-Anwendung analysiert und relevante Versuchsdaten gesammelt. Ein Großteil der bisher existierenden Untersuchungen fand an den beiden Forschungsstellen statt. Zum Zweck einer übersichtlichen Aufbereitung der eigenen und aus Literatur gesammelten Versuchsdaten, wurde eine Datenbank entwickelt, in der alle gesammelten Versuchsdaten unter Angabe ihrer Parameter implementiert werden konnten. Anhand dieser gesammelten Datenbasis, die als Überblick dient, konnten bestehende Wissenslücken offengelegt werden, die mittels eines Versuchsprogramms im Rahmen des Projekts geschlossen werden sollten. Aus einer Kombination von 110 Kleinversuchen und 26 Trägerversuchen am Konstruktionsdetail der unbelasteten Quersteife konnten der Mittelspannungseinfluss, der Einfluss mehrstufiger Belastung, Effekte durch eine Vorschädigung und der Bauteileinfluss gezielt untersucht werden.

Mit dieser, durch eigene Versuchsdaten erweiterten Datenbank konnten einzelne Einflüsse für die drei Konstruktionsdetails unbelastete Quersteife, querbeanspruchter Stumpfstoß und unbelastete Längssteife identifiziert werden. Zur Klärung von Einflüssen, die aufgrund mangelnder Versuchsanzahl nicht durch statistische Auswertung von Versuchsserien geklärt werden konnten, wie beispielweise geometrische Einflüsse, wurden mit Hilfe numerischer Methoden Modelle zu deren Erfassung entwickelt. Beispielsweise wurde für den Blechdickeneffekt die Abhängigkeit des Kerbfaktors von der Basisblechdicke, bzw. Abstand der Schweißnahtfußpunkte bestimmt.

Darüber hinaus wurden die aktuell zur Verfügung stehenden Bemessungsansätze auf Basis des Nennspannungskonzepts dargestellt. Ein Vergleich der ausgewerteten tabellierten Versuchsdaten mit dem aktuellsten Bemessungsansatz nach den IIW-Empfehlungen wurde ausführlich anhand der einzelnen Konstruktionsdetails dargestellt. Hierbei konnten offene Punkte und auch Potential für den Entwurf der DASt-Richtlinie identifiziert werden.

Abschließend wurde aufbauend auf diesen umfassenden Untersuchungen ein Bemessungsansatz in tabellierter Form vorgestellt. Randbedingungen und beeinflussende Effekte sind darin für das jeweilige Detail berücksichtigt bzw. angegeben. Zusätzlich wurden mithilfe praxisgerechter schematischer Skizzen geeignete Konstruktionsdetails gezeigt bzw. ungeeignete Konstruktionsdetails abgegrenzt.

Abschließend wurde die Möglichkeit eines Schweißnahtwurzelsversagens erörtert. Durch eine HFH-Behandlung können konkurrierende Versagensmechanismen auftreten, die bei dem jeweiligen Schweißdetail bzw. Bauteil zuberücksichtigen sind.

8.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung und deren Anwendung auf das Bemessungskonzept

8.2 Conclusion of Results of investigation and application to design concept

Zunächst konnte durch eigene Versuchsserien, beispielsweise die Trägerserie T1 und Kleinversuchsserie E1 ein deutlicher Ermüdungsfestigkeitsgewinn unter Wechselbeanspruchung gegenüber Trägerserie T2 und Kleinversuchsserie E2 bestätigt werden. Des Weiteren konnte der Bauteileinfluss für HFH-behandelte unbelastete Quersteifen durch die eigenen Versuchsreihen näher identifiziert werden. Innerhalb einer Versuchsserie mit zyklisch vorgeschädigten Quersteifenproben, anschließender HFH-Behandlung und abschließender zyklischer Versuchsdurchführung konnte der Effekt durch eine Vorbeanspruchung für die unbelastete Quersteife abgeschätzt werden. Eine weitere Versuchsserie unter hoher Zugschwell- und Druckschwellbeanspruchung mit geringen Lastwechselzahlen, konnte die Wirksamkeit einer HFH-Nachbehandlung bei hohen quasi-statischen Vorbeanspruchungen offenlegen.

Mithilfe dieser umfassenden Versuchsserien wurde die Datenbank, bestehend aus gesammelten relevanten HFH-Versuchsdaten ergänzt, so dass eine anschließende statistische Auswertung unter Berücksichtigung aller relevanten, existierenden HFH-Versuchsergebnisse stattfinden konnte.

Die beeinflussenden Effekte, wie Stahlgüte, Spannungsverhältnis und Blechdickeneinflüsse, wurden bei der Auswertung für das jeweils vorliegende Detail berücksichtigt. So hat sich für alle drei Details ein deutlicher Mittelspannungseinfluss gezeigt. In diesem Zusammenhang fiel auf, dass sich eine Wechselbeanspruchung sehr viel günstiger auswirkt als eine Beanspruchung unter Zugschwellbeanspruchung $R = 0,1$ und hoher Zugschwellbeanspruchung $R = 0,5$. Die Abhängigkeit der durch HFH-Behandlung verbesserten Ermüdungsfestigkeit von der Streckgrenze konnte anhand der statistischen Auswertung aller gesammelten Daten bestätigt werden.

Aufgrund der geringen Datenbasis an Bauteilversuchen der untersuchten Details, konnte nur für die Quersteife ein gewisser Bauteileffekt bestätigt werden. Dieser wurde jedoch in Hinblick auf die Bemessungsgrenzen als unkritisch bewertet.

Hinsichtlich des Blechdickeneffekts der einzelnen Konstruktionsdetails durch die Serienauswertung konnten, aufgrund der geringen Datenbasis unter vergleichbaren Bedingungen, lediglich Tendenzen aufgezeigt werden. Genauere Aussagen konnten jedoch hier unterstützt durch Parameterstudien unter Variation von Blechdicken mittels Kerbspannungsbetrachtungen mit Finite Elemente Methode getroffen werden.

Mithilfe von numerischen Untersuchungen, experimentellen Analysen und einer Auswertung bestehender Versuchsdaten konnten Werte für die verbesserte Ermüdungsfestigkeit von drei Konstruktionsdetails unter HFH-Nachbehandlung in Form von tabellierten Werten gegeben werden. Somit besteht unter Anwendung der tabellierten Vorschläge (siehe Abbildung 8-1) die

Möglichkeit auf Basis des Nennspannungskonzepts nach DIN EN 1993-1-9 [16] den Ermüdungsnachweis für HFH-behandelte Konstruktionen zu führen.

Stahlgüte nach DIN EN 10025	R [-] ²⁾		
	-1,0	0,1	0,5
S235 ≤ f _t < S355	100 (x DB)	100 (102,0)	80 (x DB)
S355 ≤ f _t < S550	160 (234,3)	140 (158,7) / (142,0)	90 (90,5)
S550 ≤ f _t ≤ S700	160 (305,7)	160 (188,2)	125 (134,7)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	R [-] ²⁾		
	-1,0	0,1	0,5
S235 ≤ f _t < S355	1	1	1
S355 ≤ f _t < S550	160 (k DB)	140 (153,3) / (145,5)	100 (107,6)
S550 ≤ f _t ≤ S700	160 (305,5)	160 (185)	140 (159,3)

Stahlgüte nach DIN EN 10025	R [-] ²⁾		
	-1,0	0,1	0,5
S235 ≤ f _t < S355	112	112 (123,5)	80
S355 ≤ f _t < S550	160*	140 (145,5)	90 (89,9)
S550 ≤ f _t ≤ S700	160* (197,6)	160 (145,5)	140 (89,9)

Abbildung 8-1: Übersicht der verbesserten Ermüdungsfestigkeit in tabellierter Form

Figure 8-1: Overview of improved fatigue resistance in tabulated form

Darüber hinaus konnten durch statistische Auswertung aller existierenden Versuchsserien und der eigenen Versuche Grenzwerte für die Höhe der Beanspruchung HFH-behandelter Details in Abhängigkeit der Streckgrenze des vorliegenden Werkstücks bestimmt werden. Weitere Grenzen der Effektivität der HFH-Behandlung für das jeweilige vorliegende Detail wurden durch Mindestlastwechselzahlen gegeben.

Auf konstruktiver Seite wurden die Anwendungsgrenzen durch praxisorientierte Skizzen von Ausführungsvarianten drei untersuchten Kerbdetails ergänzt für die, die Zuverlässigkeit des Bemessungsvorschlags aus den Tabellen (Tabelle 40, Tabelle 42, Tabelle 44) abgesichert bzw. nicht völlig abgesichert sind.

8.3 Ausblick

8.3 Outlook

Eine Vielzahl an Untersuchungen beschäftigt sich mit den drei Konstruktionsdetails unbelastete Quersteife, unbelastete Längssteife und querbelastete Stumpfstoß. Inwieweit diese Ergebnisse übertragbar sind auf praxisgerechte ähnliche Konstruktionsdetails, wie sie im Brückenbau, Kranbahnbau oder Offshore-Energie-Bereich tatsächlich Anwendung finden, bleibt vor allem mit Hilfe numerischer und experimenteller Untersuchungen zu prüfen. Ein Beispiel hierfür ist das Gurtlamellenende.

Vielfach sind geschweißte Konstruktionen und deren Beanspruchungen sehr viel komplexer und es ergeben sich Kombinationen aus Schweißdetails oder mehraxial beanspruchte geschweißte Verbindungen, so dass eine simple Beurteilung und Entkopplung zu einem einzelnen Konstruktionsdetail mit einfacher Beanspruchungsrichtung nicht gegeben ist. Hier könnten beispielsweise vertiefte experimentelle Untersuchungen Aufschluss auf die Beeinflussung mehraxialer Spannungszustände auf die Anwendung der HFH-Verfahren bieten.

Die Versuchsreihe zur Anwendung bei Bestandskonstruktionen hat gezeigt, dass durch die HFH-Behandlung die Lebensdauer nach der Vorbelastung wieder auf den Ursprungswert eines unbehandelten Kerbdetails zurückgesetzt werden konnte. Somit konnte das Bauteil in den Zustand eines Neubauteils versetzt werden.

Falls eine Bestandskonstruktion durch die Vorschädigung bereits Risse aufweist, muss das Bauteil zunächst durch eine Reparaturschweißung Instand gesetzt werden. Hier bedarf es der weiterführender Untersuchungen. Zwar konnten experimentelle Untersuchungen innerhalb des Versuchsprogramms dieses Projekts zeigen, dass eine Anwendung der HFH-Verfahren auf

vorgeschädigten Konstruktionen wirksam ist. Sie hängt jedoch im hohen Maß von der vorliegenden Risstiefe, bzw. dem Grad der Vorschädigung ab.

Aus diesem Grund ist die Beurteilung des Zustands der vorliegenden vorgeschädigten Schweißnaht maßgeblich für eine anschließende HFH-Nachbehandlung. Dieses Thema wird jedoch durch die hier verfolgten Ansätze nicht vollständig abgedeckt, sondern hier empfehlen sich weitere Untersuchungen mit Hilfe von bruchmechanischen Betrachtungen.

9 Literaturverzeichnis

9 Bibliography

- [1] ANSYS Inc.; Ansys Release 13.0 User`s Manual. Canonsburg, USA.
- [2] Berg, J.: Einfluss des Höherfrequenten Hämmerns auf die Ermüdungsfestigkeit geschweißter ultrahochfester Feinkornbaustähle, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2016.
- [3] Breunig, S.: Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten und ihrer Nachbehandlung im Brückenbau, Dissertation, in Vorbereitung.
- [4] Brozetti, J., Hirt, M. A., Ryan, I., Sedlacek, G., Smith, I. F. C.: Background Informations on Fatigue design rules – Statistical Evaluation, Chapter 9 – Document 9.01. 1989.
- [5] Bucak, Ö., Buschner, J., Ehard, H.: Maßstabeffekt im Stahlbau. Ermüdungsverhalten unterschiedlicher Kerbdetails im Hinblick auf Schweißnahtnachbehandlungsverfahren und Reparaturmaßnahmen unter Berücksichtigung des Maßstabeffekts, AiF Nr. 1706X08, FOSTA P801, 2012.
- [6] Bühler, H., Pfalzgraf, H. G.: Untersuchungen über den Abbau von Eigenspannungen in Gußeisen und Stahl durch mechanisches Rütteln und Langzeitlagerung im Freien, VDI-Forschungsheft 494, VDI-Verlag Düsseldorf, 1962.
- [7] Centre of Environmental Science – Leiden University (CML): Characterization and normalization factors. Leiden. 2016 URL: <https://www.univeriteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-charaterisation-factors>.
- [8] Dally, J. W., Riley, W. F., Experimental Stress Analysis, McGraw-Hill Inc. US, 3.Auflage, 1991.
- [9] DAST-Richtlinie 007 Lieferung, Verarbeitung und Anwendung wetterfester Baustähle, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, 1993.
- [10] DIN 820-2: Normungsarbeit – Teil 2: Gestaltung von Dokumenten, 2008.
- [11] DIN 820-4: Normungsarbeit – Teil 4: Geschäftsgang, 2007.
- [12] DIN 4132 Kranbahnen – Stahltragwerke – Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung, 1981.
- [13] DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.
- [14] DIN EN 1993-1-1 2010-12. Eurocode 3: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.*
- [15] DIN EN 1993-1-8: 2010-12. Eurocode 3: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen.*
- [16] DIN EN 1993-1-9: 2010-12. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung.*
- [17] DIN EN 1993-2: 2010-12. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken.

- [18] DIN EN 1993-2: 2014-10. Nationaler Anhang. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken.
- [19] DIN EN 1090-2: 2015-07. Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken.
- [20] DIN EN 1991-2: 2010-12. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.
- [21] DIN EN 10025-1: 2005-02. *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen.*
- [22] DIN EN 10025-2: 2004. Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle.
- [23] DIN EN 10034:1993 I- und H-Profile aus Baustahl: Grenzabmaße und Formtoleranzen.
- [24] DIN EN ISO 3452-1: Zerstörungsfreie Prüfung – Eindringprüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen, Deutsches Institut für Normung, 2014.
- [25] DIN EN ISO 5817: Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten, Deutsches Institut für Normung, 2014.
- [26] DIN EN ISO 6507-1: *Metallische Werkstoffe: Härteprüfung nach Vickers*
- [27] DIN EN ISO 9015-1: 2011-05. Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Härteprüfung – Teil 1: Härteprüfung für Lichtbogenschweißverbindungen.
- [28] DIN EN ISO 9934-1: Zerstörungsfreie Prüfung – Magnetpulverprüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen, Deutsches Institut für Normung, 2002.
- [29] DIN EN ISO 15614-1: 2015-08. Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Schweißverfahrensprüfung - Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen.
- [30] Dürr, A.: Zur Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höherfesten Baustählen bei Anwendung von UIT-Nachbehandlung. Dissertation, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2007.
- [31] Dürr, A., Bucak, Ö., Roth, J.: Size effect of as-welded and post-weld treated construction details under fatigue loading, Eurosteel 2017, September 13-15, 2017, Copenhagen, Denmark, 2017.
- [32] Esonix – Ultrasonic Impact Technology, Applied Ultrasonics, Präsentation, 200x.
- [33] Euler, M., Kuhlmann, U.: Statistical intervals for evaluation of test data acc. To Eurocode 3 Part 1-9, Contribution to Working Group 6.3: Statistical Analysis of Fatigue Data ECCS Technical Committee 6 – Fatigue, 2nd unpublished draft, 2014.
- [34] Fatigue Design Handbook, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA., 1986.
- [35] Feldmann, M., Bartsch, H., Kuhlmann, U., Drebenstedt, K., Ummenhofer, T.: Neubewertung und Erweiterung des Kerbfallkatalogs nach Eurocode 3 für eine zukunftsfähige Auslegung hochbeanspruchter Stahlkonstruktionen, laufendes FOSTA-DASt-AiF-Forschungsvorhaben IGF-Nr. 19178, 2017-2020.
- [36] Fricke, W.: IIW Recommendations for the Fatigue Assessment of Welded Structures By Notch Stress Analysis, Woodhead Publishing, Cambridge, 2012.

- [37] Gerster, P.: Praktische Anwendungen der PIT-Technologie, Stahlbau 78, Heft 9, S.680-683, Ernst&Sohn Verlag, 2009
- [38] Goerg, P., Über die Aussagefähigkeit von Dauerversuchen mit Prüfkörpern aus Baustahl St 37 und St 52 und die systematische Einordnung der Versuchswerte zum Dauerfestigkeitsschaubild, Der Stahlbau 2/1963.
- [39] Gudehus, H., Zenner, H., Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) Düsseldorf, 1999.
- [40] Günther, H. P., Kuhlmann, U.: Nachweiskonzepte zur Bemessung ermüdungsbeanspruchter Bauteile unter Berücksichtigung von Schweißnahtnachbehandlungsverfahren durch höherfrequentes Hämmern, Stahlbau 78 (2009), Heft 9, S. 613-621.
- [41] Gurney, T. R., Fatigue of welded structures, Cambridge University Press, 1979.
- [42] Gurney, T. R., The fatigue strength of transverse fillet welded joints, Cambridge: Abington Publishing, 1991.
- [43] Gurney, T. R.; Maddox, S. J.: A re-analysis of fatigue data for welded joints in steel. In: Welding Research International 3 Nr. 4 (1973), S. 1–54.
- [44] Haagensen, P. J., Improvement of the fatigue strength of welded joints, International Conference: Special and plenary sessions – Steel in marine structures, 1981.
- [45] Haagensen P.J., Maddox S.J.: IIW Recommendations on methods for improving the fatigue strength of welded joints, Woodhead Publishing, 2013.
- [46] Haagensen P.J., Maddox S.J.: IIW Recommendations on post weld improvement of steel and aluminum structures, International Institute of Welding, Doc. XIII-1815-00, 2006.
- [47] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, Springer, 2006.
- [48] Heckel, K., Köhler, J.: Experimentelle Untersuchung des statistischen Größeneinflusses im Dauerschwingversuch an ungekerbten Stahlproben. Zeitschrift Werkstofftechnik 6 (1974), S. 52 – 54.
- [49] Helms, R.; Jaenicke, B. ; Wohler, H. ; Bork, C.-P.: Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger / Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Forschungsbericht 164. 1989.
- [50] HiFIT, Lebenslänglich für Schweißkonstruktionen – Die Revolution für Schweißkonstruktionen: Schweißnaht-Nachbehandlung mit HiFIT, Werbebroschüre, 2017.
- [51] Hobbacher, A. F.: “Recommendations for fatigue design of welded joints and components”, Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- [52] ISO/TR 14345: 2012-06. Fatigue - Fatigue testing of welded components - Guidance.
- [53] Korrespondenz von Prof. Seeger und Prof. Oxfort im Rahmen des DAST-Unterausschusses Betriebsfestigkeit, Schreiben vom 16.05.1988
- [54] Krohn, A., Petershagen, H.: Einfluß von Einbrandkerben auf die Festigkeit automatisch geschweißter Kehlnähte, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Bericht Nr. 395. 1980.
- [55] Kuhlmann, U., Euler, M., Kudla, K.: Weiterentwicklung und Spezifizierung der Ermüdungsnachweise für Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Stahl, DAST-Forschungsbericht, IGF-Nr. 15380, Stuttgart, 2011.

- [56] Kuhlmann, U., Günther, H.-P.: Experimentelle Untersuchungen zur ermüdungssteigernden Wirkung des PIT-Verfahrens, Versuchsbericht, Uni Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2009.
- [57] Kuhlmann, U., Günther, H.-P.: Zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Stahlträger mit schlanken Stegen, DASt-AiF-Forschungsprojekt, Abschlussbericht, 1999.
- [58] Kuhlmann, U., Euler, M., Kranbahnträger – Wirtschaftliche Bemessung und Konstruktion robuster Radlasteinleitungen, DASt-AiF-Forschungsprojekt, Abschlussbericht, 2007.
- [59] Kuhlmann, U., Bergmann, J., Dürr, A., Thumser, R.: Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung. AiF-Vorhaben Nr. 13866, P 620, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. 2006.
- [60] Kuhlmann, U., Euler, M., Kudla, K., Weiterentwicklung und Spezifizierung der Ermüdungsnachweise für Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Stahl, Forschungsbericht, DASt-AiF15380, Stuttgart, 2011.a
- [61] Kuhlmann, U., Kudla, K., Ummenhofer, T., Weidner, P., Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau, Schlussbericht, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2013.
- [62] Kuhlmann, U., Kudla, K.: Ermüdungsfestigkeit von Lamellenstößen bei Vollwandträgern mit dicken Gurten – Experimentelle und numerische Untersuchungen, Stahlbau 84 (2015), Heft 3, S. 203 – 212.
- [63] Kuhlmann, U.; Herter, K.-H.; Euler, M.; Rettenmeier, P.: Versuchsbasierte Ermüdungsfestigkeitswerte der Radlasteinleitung – FOSTA P895 (Schlussbericht zu IGF-Forschungsvorhaben Nr. 17292), Düsseldorf: Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA) e. V., 2015.
- [64] Kuhlmann, U., Breunig, S., Pascual, A., Maier, P., Ummenhofer, T., Zinke, T., Mensinger, M., Pfaffinger, M., Fischer, M., Schneider, S., Lenz, K., Beck, T.: Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundeisenbahnbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit, FOSTA/AiF-Schlussbericht P978, Stuttgart, 2017.
- [65] Kuhlmann, U., Maier, P., Ummenhofer, T., Zinke, T., Mensinger, M., Pfaffinger, M., Fischer, M., Beck, T., Lenz, K., Schneider, S., Friedrich, H., Kaschner, R., Krieger, J., Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit, FOSTA-AiF-Schlussbericht, P843, 2015.
- [66] Kuhlmann, U., Maier, P., da Silva, L., Gervásio, H., Brett, Ch., Schröter, F., et al: Sustainable steel-composite bridges in built environment (SBRI), Final Report, Grant Agreement RFSR-CT-2009-00020, 2013.
- [67] Leitner, M., Stoschka, M., Eichlseder, W., Fatigue enhancement of thin-walled, high-strength steel joints by high-frequency mechanical impact treatment, Weld World 58 (2014), pp. 29 – 39.
- [68] Marquis, G. B., Z., Barsoum, IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) - Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, Springer, 2016.
- [69] Marquis, G., Björk, T.: Variable amplitude fatigue strength of improved HSS welds, IIW Document XIII-2224-08, 2008.

- [70] Minner, H. H.: Schwingfestigkeitserhöhung von Schweißverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen StE 460 und StE 690 durch Einsatz des WIG-Nachbehandlungsverfahrens, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1981.
- [71] Naumann, D.: Müssen Aussteifungen an Eckverbindungen ausgeklingt werden?, der praktiker 30 (1978), Heft 5, S. 90.
- [72] Neher, M., Telljohann, G., Grave, M.: Erhöhung der Lebensdauer geschweißter Bauteile durch Einsatz höherfrequenter Hämmerverfahren, Stahlbau 82 (2013), Heft Nr.4, S. 282 – 288.
- [73] Neumann, A.: Probleme der Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen, VEB Verlag Technik Berlin, 1960.
- [74] Niemi, E., Fricke, W., Maddox, S. J.: Fatigue Analysis of Welded Components - Designer's guide to structural hot-spot stress approach. Woodhead Publishing, Cambridge UK, 2006.
- [75] Nussbaumer, A.: Etablissement de courbes de fatigue pour les assemblages soudés par-achevés. Construction Métallique, Jg. 34, Heft 1, 1996, S. 3-14.
- [76] Nussbaumer, A., Imhof, D.: On the practical use of weld improvement methods, in Prog. Struct. Engng Mater. 2001, 3, S. 95 – 105.
- [77] Okawa, T., Shimanuki, H., Funatsu, Y., Nose, T., Sumi, Y.: Effect of preload and stress ratio on fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment, Weld World 57 (2013), pp. 235 – 241.
- [78] Örjasäter, O.: Effect of plate thickness on fatigue of welded components, IIW Doc. XIII-1582-95/XV-890-95, Trondheim, Norway, 1995.
- [79] PITEC GmbH, Betriebsanleitung für PSM – S10-00.
- [80] Puthli, R., Herion, S., Hrabowski, J., Ummenhofer, T., Weich, I., et al.: Detaillösungen bei Ermüdungsfragen und dem Einsatz hochfester Stähle bei Offshore Windenergieanlagen, FOSTA-AiF-Schlussbericht, P633, 2008.
- [81] Radaj, D.: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 143, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 2002.
- [82] Radaj, D., Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit – Grundlagen für Ingenieure, Springer, 2007.
- [83] Schütz, W.: Über eine Beziehung zwischen der Lebensdauer bei konstanter und bei veränderlicher Beanspruchungsamplitude und ihre Anwendbarkeit auf die Bemessung von Flugzeugbauteilen, Z. f. Flugwissenschaften 15 (1967) Heft 11, S. 407 - 419.
- [84] Sedlacek, G., Hobbacher, A., et al, Commentary to Eurocode 3: EN 1993 – Part 1-9 – Fatigue. First Edition, 2007.
- [85] Shams-Hakimi, P., Yildirim, H. C., Al-Emrani, M.: The thickness effect of welded details improved by high-frequency mechanical impact treatment, International Journal of Fatigue 99 (2017), pp. 111 – 124.
- [86] Statnikov, E. Sh.: Ultrasonic Impact tool for strengthening welds and reducing residual stresses, New Physical Methods of Intensification of Technological Processes, 1977.

- [87] Stranghöner, N., Berg, J.: Einfluss des höherfrequenten Hämmerns auf die Ermüdungsfestigkeit ultrahochfester Stähle der Festigkeitsklassen S960, S1100 und S1300 am Beispiel geschweißter Kerbdetails, Schlussbericht Projekt P938, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. FOSTA, Düsseldorf, 2015.
- [88] Toasa Caiza, P. D., Ummenhofer, T.: Consideration of the runouts and their subsequent retests into S-N curves modelling based on a three-parameter Weibull distribution. International Journal of Fatigue, Vol. 106 (1), 2018, pp. 70 – 80.
- [89] Toasa Caiza, P. D., Ummenhofer, T.: General probability weighted moments for the three-parameter Weibull distribution and their application in S-N curves modelling. International Journal of Fatigue, Vol. 33 (12), 2011, pp. 1533 – 1538.
- [90] Ummenhofer T., et al.: *Lebensdauererlängerung neuer und bestehender geschweißter Stahlkonstruktionen*. REFRESH-Projekt, Final report, 2009.
- [91] Ummenhofer, T., Weidner, P., Kuhlmann, U., Kudla, K., Breunig, S.: Entwicklung eines einfachen Qualitätssicherungstests für die Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren, FOSTA-Schlussbericht P872, 2017.
- [92] Ummenhofer, T., Weidner, P.: Verbesserungsfaktoren zur Berücksichtigung höherfrequenter Hämmerverfahren beim Ermüdungsnachweis, Ernst&Sohn Verlag, Stahlbau Spezial – Erneuerbare Energien (2014), S. 16-25.
- [93] Ummenhofer, T., Weich, I., Nitschke-Pagel, T.: Lebens- und Restlebensdauererlängerung geschweißter Windenergieanlagentürme und anderer Stahlkonstruktionen durch Schweißnahtnachbehandlung. Stahlbau 74 (2005), 412-422.
- [94] Ummenhofer, T., Weidner, P., Zinke, T.: New and existing bridge constructions - increase of fatigue strength of welded joints by high frequency mechanical impact treatment. Proceedings of the international scientific conference on road research and administration (CAR 2013), Bucharest, Romania, July 4-5, 2013.
- [95] Ummenhofer, T., Weidner, P., Zinke, T., Mehdiانpour, M., Rogge, A.: Fertigungs- und Instandhaltungsoptimierung bei Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen. Forschung für die Praxis P864, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA), Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2016.
- [96] United Kingdom Offshore Steel Research Project, Final Report to ECSC Contract No. 7210 KB / 8, 801, Volume 1 and 2 Department of Energy, London.
- [97] VDI-Richtlinie: VDI 2227 Festigkeit bei wiederholter Beanspruchung; Zeit- und Dauerfestigkeit metallischer Werkstoffe, insbesondere von Stählen, VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, a1974.
- [98] Weibull, W.: A statistical theory of the strength of materials, Ingeniörsvetenskapsakademiens, Handlingar Nr. 151, Stockholm, 1939.
- [99] Weich, I., Ermüdungsverhalten mechanisch nachbehandelter Schweißverbindungen in Abhängigkeit des Randschichtzustands, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2009.
- [100] Weich, I., Ummenhofer, T., Nitschke-Pagel, T., Dilger, K., Eslami, H.: Fatigue Behaviour of Welded High-Strength Steels after High Frequency Mechanical Post-Weld Treatments, Welding in the World 53 (2009), S. R322–R332.

- [101]Woodtli, J.: Praktische Fraktographie – Brüche an metallischen und keramischen Bauteilen sowie an Objekten aus Glas, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, 2003.
- [102]Yildirim, H. C., Marquis, G. B.: A round robin study of high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joints subjected to variable amplitude loading. *Welding in the World* (2013) 57, pp. 437 – 447.
- [103]Yildirim, H.; Marquis G.; Barsoum Z.: Fatigue assessment of high frequency mechanical impact (HFMI)-improved fillet welds by local approaches, *International Journal of Fatigue* 52 (2013), S. 57-67. Elsevier Ltd.

10 Danksagung

10 Acknowledgement

Das Forschungsvorhaben (Nr. 17886 N/2) der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (DASt) wurde im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über die AiF finanziert. Die Autoren dieses Forschungsberichts möchten sich herzlich für die erfahrene finanzielle Unterstützung bedanken.

Für die Betreuung und Förderung sei dem Deutschen Ausschuss für Stahlbau (DASt) herzlich gedankt, ebenso wie Herrn Volker Hüller für die Leitung und Organisation der Sitzungen des DASt-Ausschusses, der dem Projekt als projektbegleitendem Ausschuss diente. Hier wurde den Mitgliedern des DASt-Ausschusses regelmäßig die aktuellen Forschungsergebnisse präsentiert. Die Autoren bedanken sich bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die anregenden Diskussionen und konstruktiven Ergänzungen zu diesem Vorhaben.

Auch im Fachgremium *Fachgemeinschaft Brückenbau* wurde der aktuelle Projektstatus regelmäßig vorgestellt und mit Anregungen und Kommentaren zum Gelingen dieses Forschungsprojekts beigetragen.

Insbesondere gilt ein großer Dank folgenden Firmen, die durch Ihre großzügigen Sach- und Dienstleistungsspenden die Untersuchungen unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt den Sponsoren und Spendern der Fertigung der Versuchskörper, wie auch den Firmen *Stahlwerk Thüringen* und *Salzgitter AG* für die großzügige Stahlträgerspende, sowie der Firma *VOEST Alpine* für die Blechspende für die Kleinversuchskörper. Die Fertigung aller Versuchskörper übernahm die Firma *Eiffel Deutschland Stahltechnologie*. Ein herzliches Dankeschön geht an die Firma *PI TEC GmbH* und *Dynatec GmbH* für die wiederkehrende Unterstützung bei der Durchführung der Nachbehandlung der Versuchskörper.

Des Weiteren danken die Autoren des Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart den Mitarbeitern der *MPA Uni Stuttgart* Herrn Dr.-Ing. V. Birtel, Herrn Dr.-Ing. D. Lotze sowie Herrn B. Schneider, Herrn H. Rigoll vom Fachbereich 2 „Baukonstruktionen und Werkstofftechnik“ für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung während aller Versuchsserien. Ebenso gilt ein großer Dank Herrn O. Schneider für die Applikation der Messtechnik und fortwährende Unterstützung von technischer Seite.

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

11 List of publications related to the project

In den folgenden Tabellen sind die Veröffentlichungen zusammengefasst, die aus dem Forschungsprojekt heraus bis zur Endberichtserstellung entstanden sind. Diese sind gleichzeitig als Maßnahmen zum Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft anzusehen.

Bereits veröffentlichte Dokumente:

Breunig, S., Kuhlmann, U.: *Increased Service Life of Fatigue Effected Structures trough High Frequency Mechanical Impact Treatments*, IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, September 23-25 2015, Geneva, Switzerland, 2015.

Kuhlmann, U., Breunig, S.: *Steigerung der Ermüdungsfestigkeit von neuen und vorhandenen Konstruktionen durch Nachbehandlung mit höherfrequenten Hämmerverfahren*, Bundesanstalt für Wasserbau - Kolloquium Korrosionsschutz und Tragfähigkeit bestehender Stahlwasserbauverschlüsse, 8. Und 9. Februar 2017, Karlsruhe, Deutschland, 2017.

Breunig, S., Kuhlmann, U.: *Considering High Frequency Mechanical Impact Treatments in Design*, IABMAS, 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 9-13 July 2018, Melbourne, Australia, 2018.

Kuhlmann, U., Breunig, S.: *Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahl- und Verbundbrückenbau*, 3. Brückenkolloquium - Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken, 19. und 20. Juni 2018, Ostfildern/Stuttgart, Deutschland, 2018.

Kuhlmann, U., Breunig, S., Ummenhofer, T., Weidner, P.: *Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren - Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen und Vorschlag eines DAST-Richtlinien-Entwurfs*, Stahlbau 87 (2018), Heft 10, S. 967 – 983.

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

Anhang A

Vorgehensweise der angewandten statistischen Auswertung der Versuchsreihen

A.1. Auswertung nach Hintergrunddokument	248
--	-----

Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei der statistischen Auswertung nach Hintergrunddokument [4] von DIN EN 1993-1-9 [16] dargestellt, die auf die Versuchsserien angewandt wurde.

A.1. Auswertung nach Hintergrunddokument

$$y = b_0 + b_1 \cdot x \quad \text{A. 1}$$

mit

$$y = \log N \quad (\text{abhängige Variable}) \quad \text{A. 2}$$

$$b_0 = \log a \quad (\text{Achsenabschnitt}) \quad \text{A. 3}$$

$$x = \log \Delta\sigma \quad (\text{unabhängige Variable}) \quad \text{A. 4}$$

$$b_1 = -m \quad (\text{inverse Neigung}) \quad \text{A. 5}$$

$$\log N = \log a - m \cdot \log \Delta\sigma \quad \text{A. 6}$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad \text{A. 7}$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad \text{A. 8}$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \quad \text{A. 9}$$

Neigung und Achsenabschnitt:

$$b_1 = -m = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad \text{A. 10}$$

$$b_0 = \log a = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i - b_1 \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad \text{A. 11}$$

Standardabweichung (bei freier Neigung m):

$$s(\log N) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{m,i})^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{S_{yy} - b_1 S_{xy}}{n-2}} \quad \text{A. 12}$$

$$s(b_1) = s(\log N) \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}} = s(\log N) \sqrt{\frac{1}{S_{xx}}} \quad \text{A. 13}$$

Standardabweichung (bei bekannter Neigung m):

$$s(\log N) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{m,i})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 \cdot x_i)^2}{n-1}} \quad \text{A. 14}$$

Vorhersageintervall der negativen inversen Neigung m:

$$m \pm t_{\alpha, n-2} \cdot s(b_1) \quad \text{A. 15}$$

Quantil der Student-Verteilung für ein zweiseitiges Intervall der Größe $1 - \alpha$ bei $n - 2$ Freiheitsgraden:

$$t_{\alpha, n-2} \text{ entsprechend Tabellenwerke mit } (1 - \alpha) = 90\% \text{ (zweiseitig)} \quad \text{A. 16}$$

Mittelwert Der Ermüdungsfestigkeit:

$$x_m = \log \Delta \sigma = \frac{y_m - b_0}{b_1} \quad \text{A. 17}$$

mit

$$y_m = \log N_c = \log(2 \cdot 10^6) \quad \text{A. 18}$$

Charakteristischer Wert der Ermüdungsfestigkeit:

$$y_{C, 1-\alpha} = y_m - k \cdot s(\log N) \quad \text{A. 19}$$

$$b_{C, 1-\alpha} = y_{C, 1-\alpha} - b_1 x_m \quad \text{A. 20}$$

$$x_{C, 1-\alpha} = \log \Delta \sigma_{C, 1-\alpha} = \frac{y_m - b_{0, C, 1-\alpha}}{b_1} = \frac{b_1 \cdot x_m - k \cdot s(\log N)}{b_1} \quad \text{A. 21}$$

Vertrauensgrenze pro Versuchsserie:

$$k = t_{\alpha, n-2} \sqrt{f} \quad (\text{bei freier Neigung } m) \quad \text{A. 22}$$

$$k = t_{\alpha, n-1} \sqrt{f} \quad (\text{bei fixer Neigung } m) \quad \text{A. 23}$$

Quantil der Student-Verteilung für ein einseitiges Intervall der Größe $1 - \alpha$ bei $n - 2$ ($n - 1$) Freiheitsgraden (entspricht dem Quantil der Student-Verteilung für ein zweiseitiges Intervall der Größe $1 - 2\alpha$, siehe Formel A. 16:

$t_{\alpha, n-2}, t_{\alpha, n-1}$ entsprechend Tabellenwerke mit $(1 - \alpha) = 95\%$ (einseitig)

$$f = 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_m - \sum_{i=1}^n x_i)^2}{S_{xx}} \quad \text{A. 24}$$

Vertrauensgrenze pro Kerbanteil:

$$k = 2 \quad \text{A. 25}$$

(entspricht dem Quantil der Student-Verteilung für ein einseitiges Intervall der Größe 97,7% bei einer ausreichenden Zahl an Freiheitsgraden)

Standardabweichung (pro Kerbdetail mit $m = 3$):

$$s(\log N) = 0,206 \text{ [35], [81]} \quad \text{A. 26}$$

Anhang B

Dokumentation der Versuchskörperfertigung

B.1.	Charakterisierung der verwendeten Materialien der Kleinversuchsserien.....	252
B.2.	Charakterisierung der verwendeten Materialien der Trägerserien	255
B.3.	Probekörpergeometrien der Versuchsserien.....	257
B.4.	Dokumentation der Kleinversuchskörperfertigung.....	259
B.5.	Dokumentation der Fertigung der Trägerversuche Serie T1	261
B.6.	Dokumentation der Fertigung der Trägerversuche Serie T2	262
B.7.	Dokumentation der Nachbehandlung Kleinversuchsserie	264
B.8.	Dokumentation der Nachbehandlung der Trägerversuchsserien	268

Im Rahmen der nachfolgend dargestellten Dokumentation der Fertigung der Versuchskörper werden zur weiteren Beschreibung folgende Abkürzungen verwendet:

AW	unbehandelt / im Zustand „wie geschweißt“ (as welded)
HFH	Schweißnahtübergänge mit höherfrequenten Hämmerverfahren (HFH) nachbehandelt, zum Einsatz kamen das HiFIT-Verfahren (HiFIT) und das PIT-Verfahren (PIT)
HiFIT	Probekörper wurde HiFIT-behandelt
PIT	Probekörper wurde PIT-behandelt
GM	Grundmaterial
T1	Trägerserie 1 (Resonanzschwing-Versuche)
T2	Trägerserie 2 (4 Punktbiegeschwing-Versuche)

B.1. Charakterisierung der verwendeten Materialien der Kleinversuchsserien

Kerbdetail	Serien-Bezeichnung	Behandlungs-zustand	Blechdicke [mm]	Werkstoff	Anzahl Versuche
Quersteife	DAS _T _T1	AW, PIT, HiFIT	HEA 260	S355J2+N	8
Quersteife	DAS _T _T2	AW, PIT, HiFIT	HEA 260	S355J2+N	18

voestalpine Grobblech GmbH

A02
Abnahmeprüfzeugnis
Inspection certificate
EN 10204 - 3.1

Seite 1 von 5
Page of
Z01 13-12-2013
Datum
voestalpine-Straße 3
4020 Linz, Austria
www.voestalpine.com/grobblech

A03 Beschreibungs-Nr.: Document number	Q0391467	A08 Auftrags-Nr.: Order-No.	3133298	A07 BestDat.: OrderDat.	02-09-2013	Versanddatum: Date of dispatch	13-12-2013 4F
A06 Besteller Customer	[REDACTED]	B01 Fabrikat Product	Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen hot rolled plates of structural steels			B03 Norm Standard	EN 10025-2 + EN 10025-1 : 2004 & DBS918002-01 : 2010
A07 BestNr.: OrderNo.	[REDACTED]	B02 Werkstoff Material	S355J2+N				
A08 Empfänger Consignee	[REDACTED]	B04 Lieferzustand Delivery condition	normalisierend gewalzt normalized rolled				

Z01 - Besichtigung und Maßprüfung: keine Beanstandung. Die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen entsprechen den Vorschriften.
Z01 - Visual Examination and dimensional checking: satisfactory. The results of tests performed are in compliance with the requirements.

Umfang der Lieferung - Detail of supply

B07 Schmelze Heat No.	B06 Blech-Nr Plate No	Dimensionen - Dimensions		B11 Länge Length	B08 Stück Piece	B12 Brutto Gross kg	B13 Netto Net	A09 Lief-Nr Disp-No	Sachnummer reference no.
		B09 Pos Item	B10 Dicke Thickness mm						
743478	348857/2	30	12,00	2051,0	6000	1	1.198	42382	7208529100
743478	348857/3	30	12,00	2051,0	6000	1	1.199	42382	7208529100
743478	348857/4	30	12,00	2051,0	6000	1	1.200	42382	7208529100
743478	348858/2	30	12,00	2051,0	6000	1	1.200	42382	7208529100
743478	348858/4	30	12,00	2051,0	6000	1	1.200	42382	7208529100
743478	348858/1	30	12,00	2051,0	6000	1	1.200	42382	7208529100
743478	348858/3	30	12,00	2051,0	6000	1	1.200	42382	7208529100
743803	348859/4	30	12,00	2051,0	6000	1	1.200	42382	7208529100
743803	348859/2	30	12,00	2051,0	6000	1	1.200	42382	7208529100

A04
Herstellerzeichen
Symbol of the manufacturer's work

voestalpine


Auftragsbeauftragter voestalpine
Grobblech
Inspection representative voestalpine
Grobblech
GÖLS David

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

A03 Beschleunigungs-Nr.: Document number		Q0391467		A08 Anfrags-Nr.: Order-No :		3133298		Z02 Datum Date		13-12-2013		Seite Page		2		von of		5			
Umfang der Lieferung - Detail of supply																					
B07 Schmelze Heat No.		B06 Blech-Nr Plate No		Dimensionen - Dimensions B09 Pos Item				B10 Dicke Thickness		B11 Breite Width		B11 Länge Length		B08 Stück Piece		B12 Brutto Gross		B13 A09 Netto Lief-Nr Net Disp-No		Sachnummer reference no.	
				mm		mm		mm		mm		kg		kg		130 46					
743803		348859/1		30		12,00		2051,0		6000		1		1.200		42382		7208529100			
743820		348861/1		30		12,00		2051,0		6000		1		1.210		42382		7208529100			
Summen - Sum										11		13.207									
C70 - Erschmelzungsverfahren - Stranggußmaterial: LD-Verfahren mit Vakuumbehandlung, Stahl ist voll beruhigt. - Method of steelmaking: strand casted material: pure oxygen blown with vacuum treatment; steel is fully killed.																					
B14 - Ergänzende Angaben - Supplementary information Tol. n. EN 10029/10 / Dimensional tolerances acc. EN 10029/10 Normaleben nach EN 10029/10 Klasse N / Flatness acc. EN 10029/10 class N Dickentol. n. EN 10029/10 Tab.1 Klasse A / Thickness tolerance acc. EN 10029/10 tab. 1 class A. EN10163-2: Klasse A3 - Reparaturschweißung nicht erlaubt / EN10163-2: Class A3 - Repair-welding not permitted.																					
Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse) - Chemical composition (Heat analysis)																					
B07 Schmelze Heat No.		C Si Mn P S Al Cr Ni Mo Cu V Nb Ti N B Ca																			
		% % % % % % % % % % % % % % % % % % %																			
Sollwerte >=		Set values <=																			
		.220 .550 1.600 .025 .0250 .400 .45																			
743478		.154 .236 1.450 .009 .0047 .034 .029 .020 .005 .035 .003 .017 .001 .0052 .0002 .41																			
743803		.150 .219 1.470 .007 .0026 .035 .030 .008 .002 .014 .002 .018 .001 .0048 .0002 .40																			
743820		.154 .230 1.440 .012 .0034 .033 .041 .014 .004 .013 .002 .018 .001 .0050 .0002 .41																			
C99 - Ergänzende Angaben - Supplementary information Ca: C+(Mn/6)+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15																					

voestalpine

Göls
4
Annahmebeauftragter voestalpine
Grobblech
Inspection representative voestalpine
Grobblech
GÖLS David

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

A03 Beschleunigungs-Nr.: Document number		Q0391467		A08 Anfrags-Nr.: Order-No :		3133298		Z02 Datum Date		13-12-2013		Seite Page		3		von of		5			
Ergebnisse der Prüfungen - Test results: C10-C29 Zugversuch nach EN ISO 6892-1 - C10-C29 Tensile Test acc. EN ISO 6892-1																					
B07 Schmelze Heat No.		C41 Brelte Width		PrDicke SpThickn		CO1 Prlage loc.		CO2 Lage Dir		C11 Reh Dir		C11 Rp0,2 Rp0,2		C12 Rm Rm		C12 L0 L0		C13 A E		Reh/Rm Reh/Rm	
		mm		mm		loc.		%		%		%		%		%		%		%	
Sollwerte >=		Set values <=						355 355 490		20.0		100.00									
743478		30,0		12.85		F Q		447 437		554 A5		26.4 80.72									
743803		30,0		12.91		F Q		466 456		556 A5		28.6 83.91									
743820		30,0		8.50		F Q		426 426		569 A5		26.9									
PrDicke:SpThickn: Probendicke;specimen thickness CO1:Prlage;loc.: F: Fuss;Bottom CO2:Lage;Dir: Q: quer;transverse C12: Rm: Zugfestigkeit;Tensile Strength L0: Messlänge;gauge A5: Länge = 5.65 * sqr (Fläche) mm;Length = 5.65 * sqr (area) mm C13:A;E: Bruchdehnung;elongation																					

voestalpine

Göls
4
Annahmebeauftragter voestalpine
Grobblech
Inspection representative voestalpine
Grobblech
GÖLS David

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

A03 Bescheinigungs-Nr.: **Q0391467** A08 Auftrags-Nr.: **3133298** Z02 Datum: **13-12-2013** Seite **4** von **5**
 Document number Order-No: Date Page of

Ergebnisse der Prüfungen - Test results: C40-C49 Kerbschlagbiegeversuch nach EN ISO 148-1 - C40-C49 Impact Test acc. EN ISO 148-1

B07	C40	C01	C02	C03	C42	C42	C42	C42	C43
Schmelze	Pf	Prlage	LageDicke	Lage	Temp	EW	EW	EW	MW
Heat No.	shape	loc.	PosTh.	Dir	temp	SV	SV	SV	AV
					*C	J	J	J	J
Sollwerte >=					-20	15	15	15	21
Set values <=									
743478	CV 10x7,5	F	0	L	-20	114	112	110	112
743803	CV 10x7,5	F	0	L	-20	163	156	145	155
743820	CV 10x7,5	F	0	L	-20	166	155	124	148

C40;Pf;shape: CV 10x7,5: Probenform , Abmessung;Test shape , Dimensions
 C01;Prlage;loc.: F: Fuss;Bottom
 LageDicke;PosTh.: Probenposition über Dicke;Pos Thickness
 O: Oberfläche;surface
 C02;Lage;Dir: L: längs;longitudinal
 C42;EW;SV: Einzelwert;single value
 C43;MW;AV: Mittelwert;average value

Anmerkungen - Remarks
 Ultraschallprüfung gemäß EN 10160, EN 10160 Qualitätsklasse S2 /Fläche, Raster 100 mm, EN 10160 Qualitätsklasse E3 /Randzone, Randzone 50 mm : Bedingung erfüllt
 Ultrasonic examination acc. to EN 10160, EN 10160 class S2/Body, Grid 100 mm, EN 10160 class E3/Edge Zone, Edge zone 50 mm : satisfactory
 Wir bestätigen, dass die oben angeführte Lieferung den Bestellvorschriften (Normvorschriften) entspricht.
 Die Unterschrift des Abnahmebeauftragten der voestalpine Grobblech GmbH wird durch eine elektronische Unterschrift ersetzt, da die Atteste bei voestalpine Grobblech GmbH mittels eines geeigneten Datenverarbeitungssystems erstellt werden (EN 10204, Pkt.5).
 We confirm that the above-mentioned delivery corresponds to the order (and standard).
 The signature of the inspection representative from voestalpine Grobblech GmbH is substituted by a electronic Signature, because the certificates of voestalpine Grobblech GmbH are prepared by a suitable data processing system (EN 10204, Pt.5).

voestalpine

Göls
 Abnahmebeauftragter voestalpine
 Grobblech
 Inspection representative voestalpine
 Grobblech
 GÖLS David

voestalpine
 ONE STEP AHEAD.

A03 Bescheinigungs-Nr.: **Q0391467** A08 Auftrags-Nr.: **3133298** Z02 Datum: **13-12-2013** Seite **5** von **5**
 Document number Order-No: Date Page of



0769

voestalpine Grobblech GmbH, voestalpine-Straße 3, 4020 Linz, Austria

13

EN 10025-2 + EN 10025-1 : 2004 & DBS918002-01 S355J2+N

EN 10025-2 + EN 10025-1 : 2004 & DBS918002-01 S355J2+N

Zur Verwendung bestimmt in Metallbauwerken oder in Metall-/Betonverbundbauwerken
 intended to be used in metal structures or in composite metal and concrete structures

Formtoleranzen Grenzabmaße / Tolerances on dimensions	EN 10029/10
Bruchdehnung / elongation	
Zugfestigkeit / Tensile Strength	EN 10025-2 + EN 10025-1 : 2004 & DBS918002-01
Streckgrenze / Yield Strength	
Schweißbeignung / Weldability	
Beständigkeit / Durability	
Gefährliche Substanzen / Hazardous substances	keine festgestellt / no performance determined

voestalpine

Göls
 Abnahmebeauftragter voestalpine
 Grobblech
 Inspection representative voestalpine
 Grobblech
 GÖLS David

voestalpine
 ONE STEP AHEAD.

B.2. Charakterisierung der verwendeten Materialien der Trägerserien

Von der Firma *Salzgitter AG* wurde bis zum Abschluss des Schlussberichts kein Abnahmeprüfzeugnis 3.1 zu den gespendeten Trägern zur Verfügung gestellt, deswegen beschränken sich die Prüfzeugnisse auf die Charge der Firma *Stahlwerk Thüringen GmbH*.

SWT STAHLWERK THÜRINGEN		Zertifikat Nr. 976/3-2014				
Stahlwerk Thüringen GmbH Qualitätsstelle Kronacher Straße 6 07333 Unterwellenborn Deutschland		Abnahmeprüfzeugnis 3.1 entsprechend EN 10204:2004/3.1				
Auftrags-Nr.: Ihre Bestellung: interner Auftrag		SWT				
Güte: entsprechend: S355J2+AR EN 10025-2/2004		STAHLWERK THÜRINGEN GMBH KRONACHER STRASSE, 6 07333 UNTERWELLENBORN DEUTSCHLAND				
Pos.	Charge	Profil	Entsprechend	Länge [mm]	Stück [Stk]	Gewicht [kg]
001	43512	HE 280A	DIN 1025	8 100 mm	5	2 790 kg
Schmelzanalyse [%] Charge C Si Mn P S N Al Nb V Cr max 0,20 0,25 1,80 0,030 0,030 min 0,07 0,17 1,41 0,018 0,019 0,007 0,012 0,040 0,008 0,08						
Schmelzanalyse [%] Charge Cu Ni Mo Ti CEV1 max 0,55 min 0,26 0,14 0,03 0,020 0,36						
Zugversuch (ISO 6892-1: B20) Charge Streckgrenze Zugfestigkeit Bruchdehnung Re/Rm [N/mm ²] [N/mm ²] [%] max 365 500 22,0 min 401 521 30,0 0,77						
Abnahmebeauftragter René Merbach 		 010 010 CEN 2004-08-02 SWT				
11.03.2014						

SWT STAHLWERK THÜRINGEN		Zertifikat Nr. 976/3-2014					
Stahlwerk Thüringen GmbH Qualitätsstelle Kronacher Straße 6 07333 Unterwellenborn Deutschland		Abnahmeprüfzeugnis 3.1 entsprechend EN 10204:2004/3.1					
Auftrags-Nr.: Ihre Bestellung: interner Auftrag		SWT					
Güte: entsprechend: S355J2+AR EN 10025-2/2004		STAHLWERK THÜRINGEN GMBH KRONACHER STRASSE, 6 07333 UNTERWELLENBORN DEUTSCHLAND					
Charge	Form	Temp [J]	L [mm]	1	2	3	M
43512	KV ₂ 450	-20°C	124	148	154	142	
Material ist zum Verzinken geeignet. Si: 0,14% - 0,25% Erschmelzungsart - Elektrostahl Oberflächenbeschaffenheit gemäß DIN EN 10163-3, Klasse C, Untergruppe 1 Werkstoff Nummer: 1.0577 Allgemeine technische Lieferbedingungen für warmgewalzte Baustahlprodukte: DIN EN 10025-1 Vorgesehene Verwendungen: Geschweißte, geschraubte und genietete Konstruktionen Erklärte Leistungen gemäß DoP: Toleranzen / Streckgrenze / Zugfestigkeit / Bruchdehnung Kerbschlagarbeit / Schweißseignung / Dauerhaftigkeit Abmessungs- und Formtoleranzen: HEIPE/UB/CE/PP nach DIN EN 10034 LU/PE/PFC nach DIN EN 10279 Die gelieferten Produkte überschreiten nicht die zulässigen Grenzwerte der Oberflächenkontamination laut Strahlenschutzverordnung. Es wird bestätigt, dass die Lieferung den Bestellanforderungen entspricht.							
Abnahmebeauftragter René Merbach 		 010 010 CEN 2004-08-02 SWT					
11.03.2014							



**Leistungserklärung
gemäß EU-Verordnung 305/2011, Anhang III**

Nr. 032 CPR 2013-09-02 SWT

1. Eindeutiger Kenncode des Produkttyps:

Warmgewalzte Baustahlprodukte: 1.0577

2. Typen-, Chargen- oder Seriennummer oder ein anderes Kennzeichen zur Identifikation des Bauprodukts gemäß Artikel 11 Absatz 4:

Profil S355J2 gemäß EN 10025-2

3. Vom Hersteller vorgesehener Verwendungszweck oder vorgesehene Verwendungszwecke des Bauprodukts gemäß der anwendbaren harmonisierten technischen Spezifikation:

Geschweißte, geschraubte und genietete Konstruktionen

4. Name, eingetragener Handelsname oder eingetragene Marke und Kontaktschrift des Herstellers gemäß Artikel 11 Absatz 5:

Stahlwerk Thüringen GmbH
Kronacher Straße 6
D-07333 Unterwellenborn
E-Mail: info@stahlwerk-thueringen.de

5. System oder Systeme zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit des Bauprodukts gemäß Anhang V:

System 2+

6. Im Falle der Leistungserklärung, die ein Bauprodukt betrifft, das von einer harmonisierten Norm erfasst wird:

Die vom Hersteller benannte Zertifizierungsstelle Nr. 0769

KIT Karlsruher Institut für Technologie
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Kaiserstraße 12
D-76128 Karlsruhe

führte die Erstüberprüfung der Herstellerfirma und der werkseigenen Produktionskontrolle sowie die kontinuierliche Überwachung, Einschätzung und Bewertung der werkseigenen Produktionskontrolle durch und stellte die Konformitätsbescheinigung für die werkseigene Produktionskontrolle aus.

Seite 1 von 2

7. Erklärte Leistung:

Wesentliche Merkmale	Leistung			Harmonisierte technische Spezifikation
	HE / IPE / UB / UC / BP / HP / U / UPE / PFC	gemäß EN 10034:1993 gemäß EN 10279:2000		
Toleranzen für Abmessungen	Neundicken (mm)			Werte
Streckgrenze	>	≤	min (MPa)	
	16	16	355	
Zugfestigkeit	>	≤	min (MPa)	Werte
	16	40	345	
Bruchdehnung $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$	>	≤	min (MPa)	Werte
	3	100	470	
Kerbschlagarbeit	>	≤	min (MPa)	Werte
	3	40	22	
Schweißbeignung CEV	>	≤	min (MPa)	Werte
	3	100	470	
Dauerhaftigkeit	>	≤	min (J)	Werte
	3	40	27 bei -20°C	
Dauerhaftigkeit	>	≤	max (%)	Werte
	3	30	0,45	
Dauerhaftigkeit	>	≤	max (%)	Werte
	3	30	0,45	
C: 0,20 Si: 0,55 Mn: 1,60 Cu: 0,55 P: 0,030 S: 0,030				

8. Die Leistung des Produkts gemäß den Nummern 1 und 2 entspricht der erklärten Leistung nach Nummer 7.

Verantwortlich für die Erstellung dieser Leistungserklärung ist allein der Hersteller gemäß Nummer 4. Unterzeichnet für den Hersteller und in dessen Namen von:

Unterwellenborn, 02. September 2013

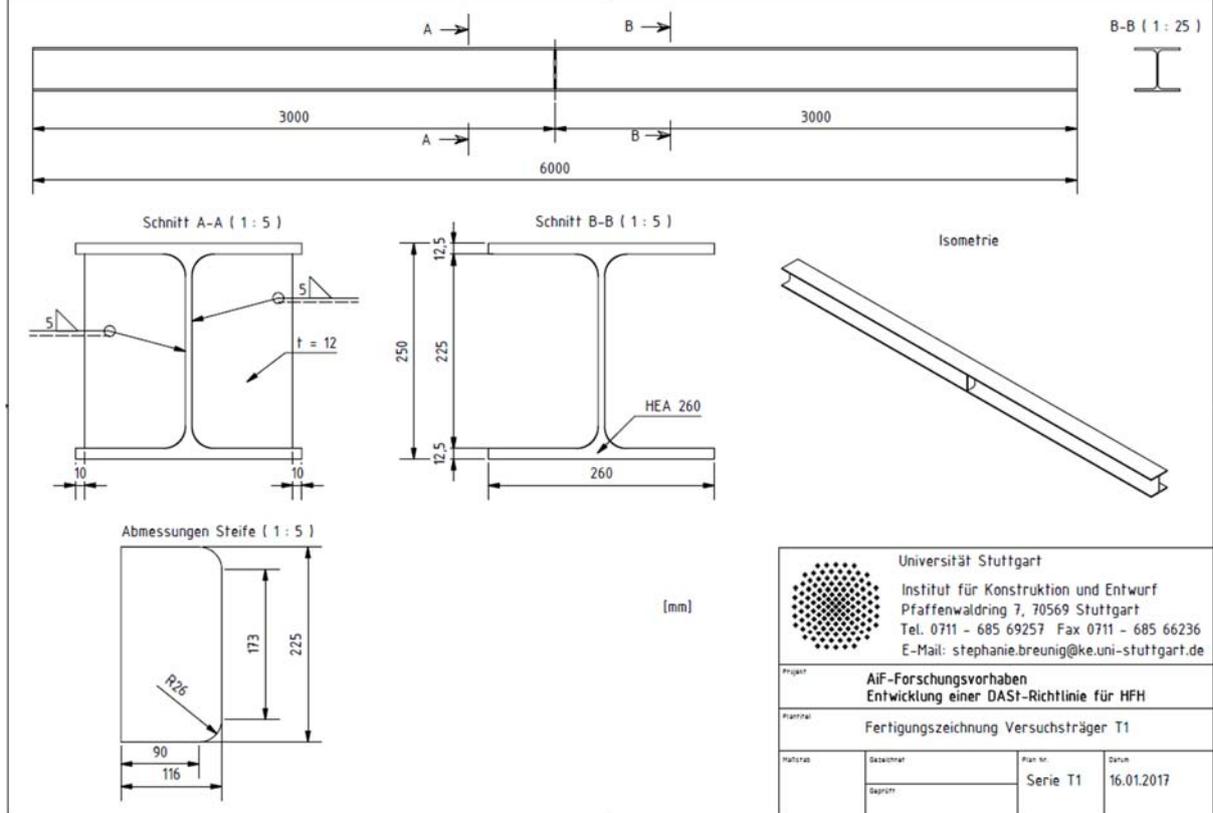
Udo Wicke
Leiter Qualitätsstelle
Stahlwerk Thüringen GmbH

Seite 2 von 2

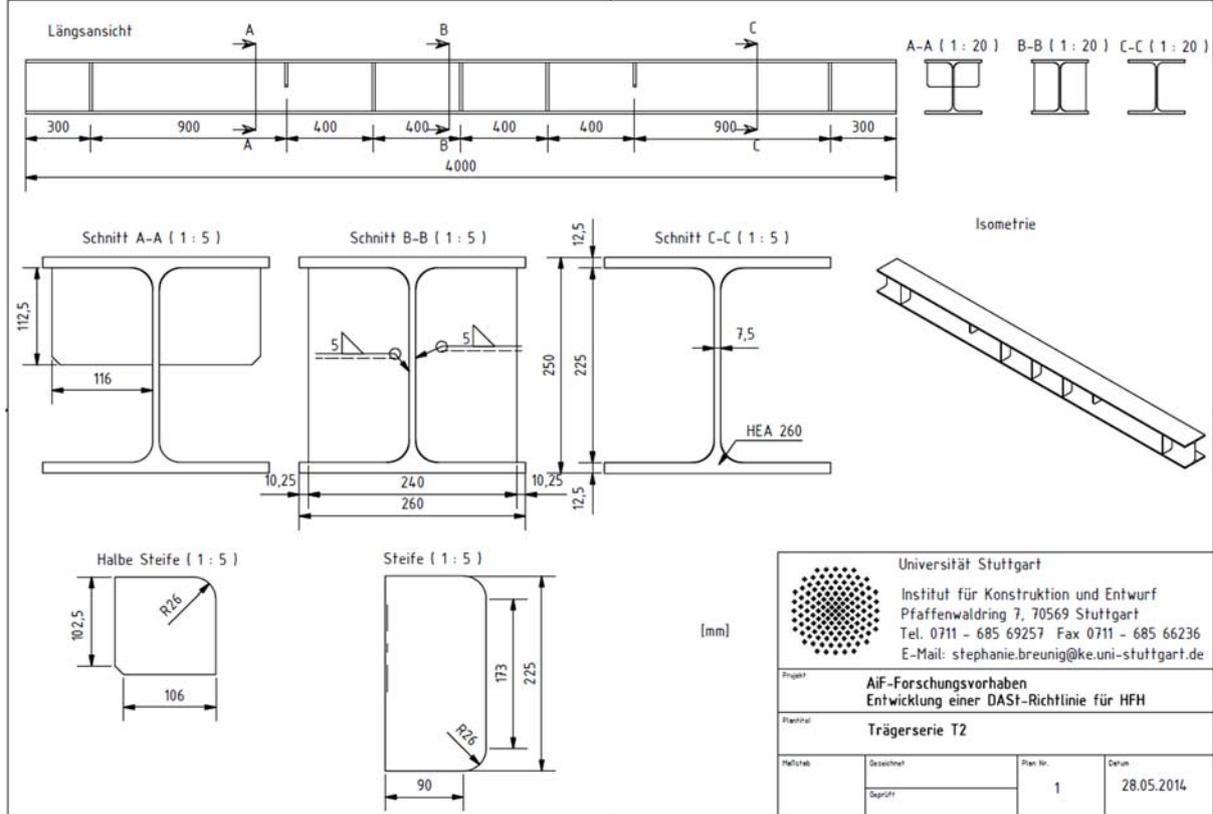
B.3. Probekörpergeometrien der Versuchsserien

Serien-Bezeichnung	Abmessungen der Probekörper
DAsT_1_E_AW DAsT_1_E_HFH DAsT_2_E_AW DAsT_2_E_HFH DAsT_3_M1_AW DAsT_3_M1_HFH DAsT_3_M2_AW DAsT_3_M2_HFH DAsT_2_E_HFH_ I_hoch/niedrig DAsT_5_E_V_HFH	
Serien-Bezeichnung	Abmessungen der taillierten Probekörper
DAsT_1_E_HFH	

Fertigungsplan Trägerserie T1



Fertigungsplan Trägerserie T2

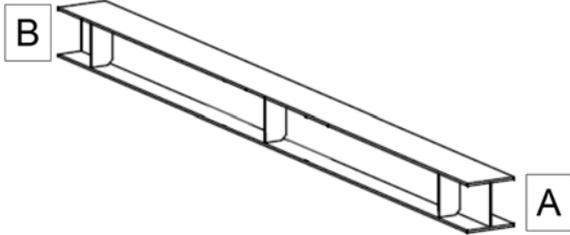
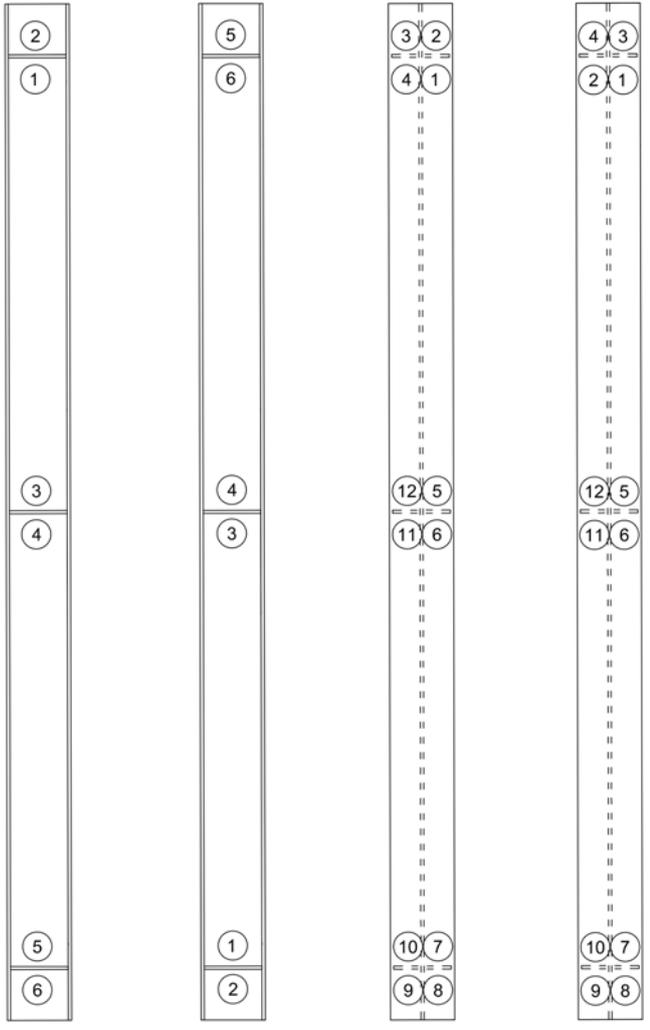
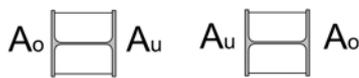
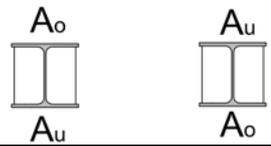


B.4. Dokumentation der Kleinversuchskörperfertigung

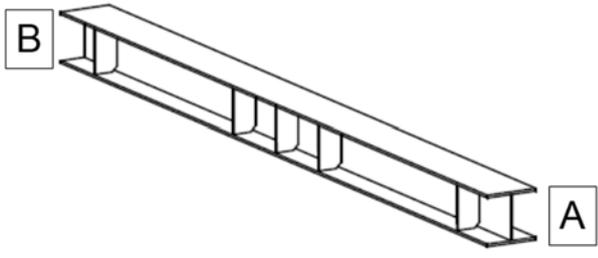
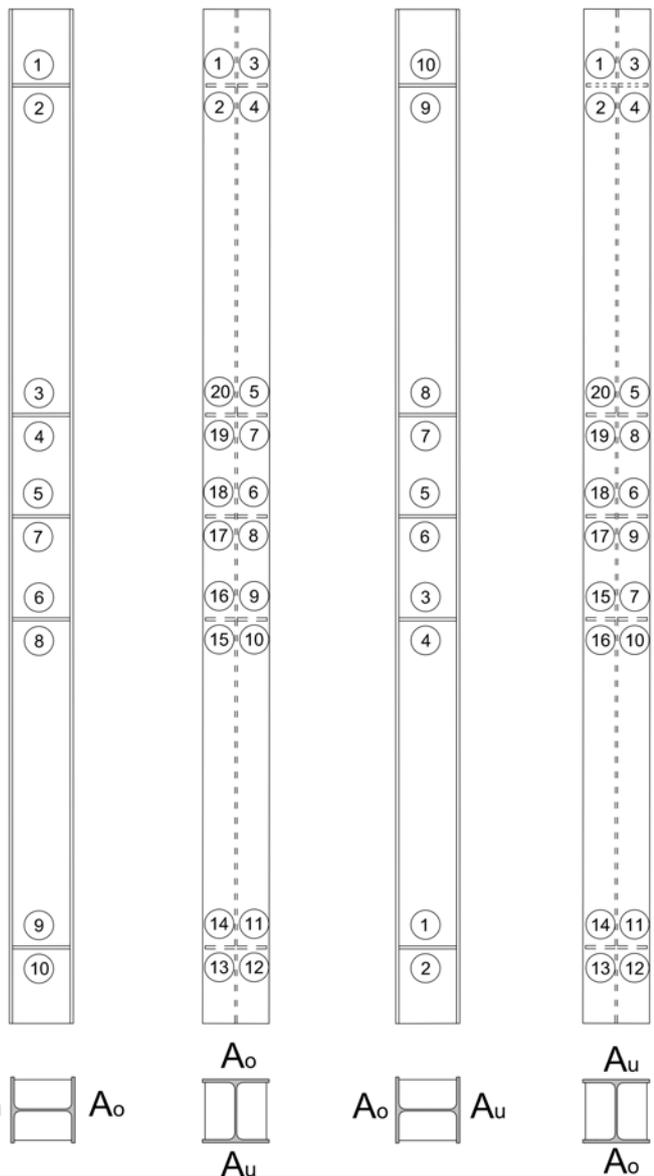
DASSt-AiF: IGF-Vorhaben 17886		Universität Stuttgart	
Projekt: „Entwicklung einer DASSt-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Institut für Konstruktion & Entwurf	
		Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt VK-Nr.:	DASSt-X (alle Klein-VK)	Zustand:	alle
Dokumentation der Fertigung der Kleinversuchsproben			
Angaben zur Fertigung		Angaben zum Schweißprozess	
Fertigungsdatum:	20.05.2014 bis 22.05.2014	Nahtart:	Kehlnaht
Hersteller:	Eiffel Deutschland	Art der Vorbereitung:	Verschleifen der Hefter
Ort:	Werk Hannover	Schweißprozess:	MAG 135 manuell
		Stromstärke [A]	309 bis 322
		Spannung [V]	29 bis 32
		Drahtvorschub [m/min]	
Beschreibung des Zusammenbaus		Schematischer Ablauf des Zusammenbaus	
<ul style="list-style-type: none"> • Heftnähte alle 300-400 mm zur temporären Befestigung der anzuschweißenden Bleche 			
<ul style="list-style-type: none"> • Anbringen von An- und Auslaufblechen mittels Heftnähte an Stirnseiten • Verschleifen aller Heftnähte 			
<ul style="list-style-type: none"> • Schweißung Schweißnaht 1 und 2 parallel mit WeldyCar in Wannenlage 			
<ul style="list-style-type: none"> • 180 °-Drehung der Großprobe • Schweißung Schweißnaht 3 und 4 parallel in Wannenlage 			
<ul style="list-style-type: none"> • Nach Abkühlung der Proben wurden die Versuchskörper mittels Sägeschnitt aus der Großprobe 			

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt VK-Nr.:	DAST-X (alle Klein-VK)	Zustand:	alle
Fotos der Fertigung der Kleinversuchsproben			
			
			
			

B.5. Dokumentation der Fertigung der Trägerversuche Serie T1

DASSt-AiF: IGF-Vorhaben 17886		Universität Stuttgart			
Projekt: „Entwicklung einer DASSt-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Institut für Konstruktion & Entwurf			
		Prof. Ulrike Kuhlmann			
Datenblatt Träger-Nr.:	Beispiel für Serie T1	Zustand:	unbehandelt		
Gesamtübersicht					
Angaben zur Fertigung		Schweißfolge			
		1	2	3	4
Fertigungsdatum:	20.05.2014 bis 22.05.2014				
Hersteller:	Eiffel Deutschland				
Ort:	Werk Hannover				
Angaben zum Schweißprozess					
Nahtart:	Kehlnaht				
Art der Vorbereitung:	Verschleifen der Hefter				
Schweißprozess:	MAG 135 manuell				
Stromstärke [A]	309 bis 322				
Spannung [V]	29 bis 32				
Drahtvorschub [m/min]					
Art der Nachbearbeitung:	Schweißspritzer entfernt				
Bemerkungen:					
<ul style="list-style-type: none"> • Sämtliche Nähte in Wannenlage • Schweißrichtung immer vom Steg weg 					
					
					

B.6. Dokumentation der Fertigung der Trägerversuche Serie T2

DASSt-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DASSt-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann			
Datenblatt Träger-Nr.:	Beispiel für T2.1	Zustand:	unbehandelt		
Gesamtübersicht					
Angaben zur Fertigung		Schweißfolge			
		1	2	3	4
Fertigungsdatum:	20.05.2014 bis 22.05.2014				
Hersteller:	Eiffel Deutschland				
Ort:	Werk Hannover				
Angaben zum Schweißprozess					
Nahtart:	Kehlnaht				
Art der Vorbereitung:	Verschleifen der Hefter				
Schweißprozess:	MAG 135 manuell				
Stromstärke [A]	309 bis 322				
Spannung [V]	29 bis 32				
Drahtvorschub [m/min]					
Art der Nachbearbeitung:	Schweißspritzer entfernt				
Nahtart:	Kehlnaht				
Bemerkungen:					
<ul style="list-style-type: none"> Sämtliche Nähte in Wannenlage Schweißrichtung immer vom Steg weg 					

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
--	--	---	--

Datenblatt Träger-Nr.:	Beispiel: T2.x & T1.x	Zustand:	alle
------------------------	-----------------------	----------	------

Fotos der Fertigung der Versuchsträger



[3]

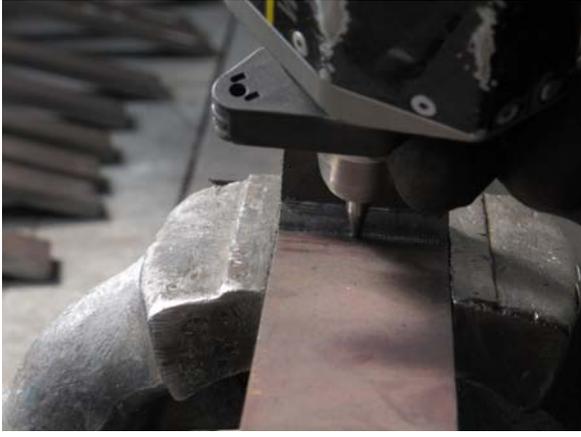


[3]



B.7. Dokumentation der Nachbehandlung Kleinversuchsserie

DASSt-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DASSt-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	Alle PIT-Träger	Zustand:	PIT
Angaben zu Einstellungen und Gerät:			
<u>Geräteeinstellungen</u>			
Versorgungsluftdruck:	6 bar		
Behandlungswinkel:	variiert		
Vorschubgeschwindigkeit:	ca. 20cm/min		
Frequenz:	Stufe 2		
<u>Bolzenhalter und Bolzen</u>			
Bolzenform:	1,5 – 4 mm	Länge des Bolzens:	110 mm
Durchmesser:	8 mm	Bolzenradius:	2 mm

DASSt-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DASSt-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	Alle PIT-Träger	Zustand:	PIT
Fotos der PIT-Nachbehandlung durch die Firma PITec GmbH			
			
			

DASSt-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DASSt-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	Alle HiFIT-Träger	Zustand:	HiFIT
Angaben zu Einstellungen und Gerät:			
<u>Geräteeinstellungen</u>			
Versorgungsluftdruck:	6,8 – 7,2 bar		
Behandlungswinkel:	variiert		
Vorschubgeschwindigkeit:	5 mm/s		
Frequenz:	Ca. 250 Hz		
Intensität:	90°, ca. 2,5 Umdrehungen		
<u>Bolzenhalter und Bolzen</u>			
Bolzenform:	Kugel	Durchmesser:	3 mm
Länge des Bolzens:	53 mm		

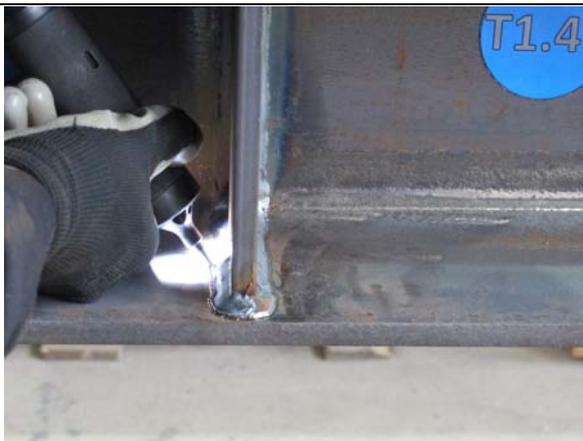
DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	Alle HiFIT-Träger	Zustand:	HiFIT
Fotos der HiFIT-Nachbehandlung durch die Firma Dynatec GmbH			
			
			

B.8. Dokumentation der Nachbehandlung der Trägerversuchsserien

DASSt-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DASSt-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	Alle PIT-Träger	Zustand:	PIT
Angaben zu Einstellungen und Gerät:			
<u>Geräteeinstellungen</u>			
Versorgungsluftdruck:	6 bar		
Behandlungswinkel:	variiert		
Vorschubgeschwindigkeit:	ca. 20cm/min		
Frequenz:	Stufe 2 (90 Hz)		
<u>Bolzenhalter und Bolzen</u>			
Bolzenform:	1,5 – 4 mm	Länge des Bolzens:	110 mm
Durchmesser:	8 mm	Bolzenradius:	2 mm

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	Alle PIT-Träger	Zustand:	PIT
Fotos der PIT-Nachbehandlung durch die Firma <i>PITec GmbH</i>			
			
[3]		[3]	
			
[3]		[3]	

DASSt-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DASSt-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	Alle HiFIT-Träger	Zustand:	HiFIT
Angaben zu Einstellungen und Gerät:			
<u>Geräteeinstellungen</u>			
Versorgungsluftdruck:	6,8 – 7,2 bar		
Behandlungswinkel:	variiert		
Vorschubgeschwindigkeit:	5 mm/s		
Frequenz:	Ca. 250 Hz		
Intensität:	90°, ca. 2,5 Umdrehungen		
<u>Bolzenhalter und Bolzen</u>			
Bolzenform:	Kugel	Durchmesser:	3 mm
Länge des Bolzens:	53 mm		

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	Alle HiFIT-Träger	Zustand:	HiFIT
Fotos der HiFIT-Nachbehandlung durch die Firma <i>Dynatec GmbH</i>			
			
[3]		[3]	
			
[3]		[3]	

Anhang C

Versuchsergebnisse Kleinbauteilversuche

C.1.	Übersicht der geprüften Versuchsserien	275
C.2.	Probekörpergeometrien der Versuchsserien	276
C.3.	Versuchsergebnisse Serie DAST_1_E_AW	277
C.4.	Versuchsergebnisse Serie DAST_1_E_HFH	278
C.5.	Versuchsergebnisse Serie DAST_2_E_AW	280
C.6.	Versuchsergebnisse Serie DAST_2_E_HFH	281
C.7.	Versuchsergebnisse Serie DAST_3_M1_AW	283
C.8.	Versuchsergebnisse Serie DAST_3_M1_HFH	285
C.9.	Versuchsergebnisse Serie DAST_3_M2_AW	287
C.10.	Versuchsergebnisse Serie DAST_3_M2_HFH	289
C.11.	Versuchsergebnisse Serie DAST_2_E_HFH_I_hoch/niedrig	291
C.12.	Versuchsergebnisse Serie DAST_5_E_V_HFH	293

Im Rahmen der nachfolgend dargestellten Dokumentation der durchgeführten Ermüdungsversuche werden zur Kennzeichnung des Behandlungszustandes und des Rissausgangsortes folgende Abkürzungen verwendet:

AW	unbehandelt / im Zustand „wie geschweißt“ (as welded)
HFH	Schweißnahtübergänge mit höherfrequenten Hämmerverfahren (HFH) nachbehandelt, zum Einsatz kamen das HiFIT-Verfahren (H) und das PIT-Verfahren (P)
I_hoch	HFH-Behandlung mit hoher Intensität
I_niedrig	HFH-Behandlung mit niedriger Intensität
H	Probekörper wurde HiFIT-behandelt
P	Probekörper wurde PIT-behandelt
iFR	innerer Schweißnahtfehler Reparaturaht
GM	Grundmaterial
N.E.	Repariert und ZfP-Prüfung nicht bestanden (nicht erneut geprüft)

Nü	Nahtübergang (ursprüngliche Naht)
NüR	Nahtübergang Reparaturaht
W	Rissausgang von Wurzel im Inneren des Probekörpers
ZL	Zwischenlage (zwischen zwei Raupen an der Decklage)

C.1. Übersicht der geprüften Versuchsserien

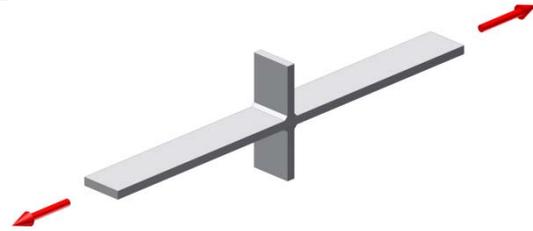
Kerbdetail	Serien- Bezeichnung	Behandlungs- zustand	Blechdicke [mm]	Werkstoff	Anzahl Versuche
Quersteife	DAS _t _1_E_AW	AW	12	S355J2+N	8
Quersteife	DAS _t _1_E_HFH	HFH	12	S355J2+N	11
Quersteife	DAS _t _2_E_AW	AW	12	S355J2+N	9
Quersteife	DAS _t _2_E_HFH	HFH	12	S355J2+N	12
Quersteife	DAS _t _3_M1_AW	AW	12	S355J2+N	8
Quersteife	DAS _t _3_M1_HFH	HFH	12	S355J2+N	14
Quersteife	DAS _t _3_M2_AW	AW	12	S355J2+N	8
Quersteife	DAS _t _3_M2_HFH	HFH	12	S355J2+N	12
Quersteife	DAS _t _2_E_HFH_I_ hoch/niedrig	HFH	12	S355J2+N	8
Quersteife	DAS _t _5_E_V_HFH	HFH	12	S355J2+N	13

C.2. Probekörpergeometrien der Versuchsserien

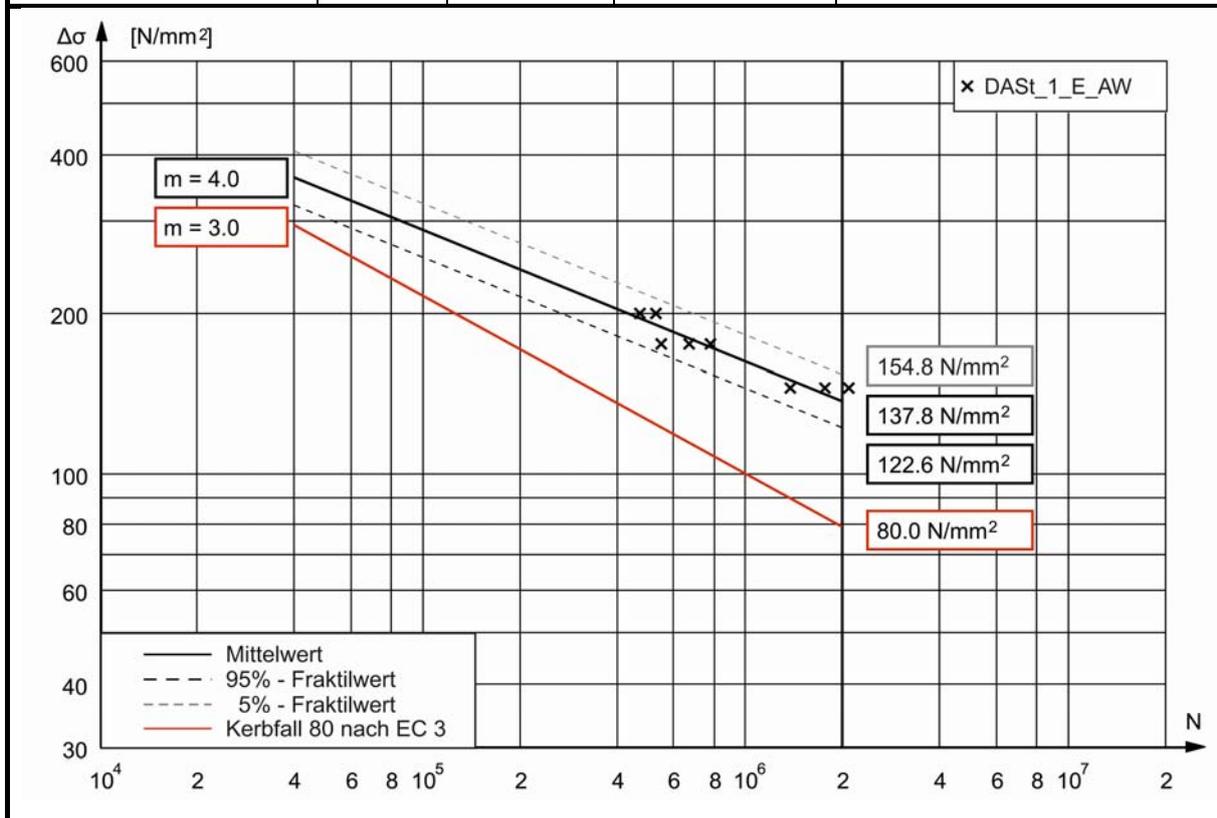
Serien- Bezeichnung	Abmessungen der Probekörper
DAsT_1_E_AW DAsT_1_E_HFH DAsT_2_E_AW DAsT_2_E_HFH DAsT_3_M1_AW DAsT_3_M1_HFH DAsT_3_M2_AW DAsT_3_M2_HFH DAsT_2_E_HFH_ I_hoch/niedrig DAsT_5_E_V_HFH	
Serien-Bezeichnung	Abmessungen der taillierten Probekörper
DAsT_1_E_HFH	

C.3. Versuchsergebnisse Serie DAST_1_E_AW

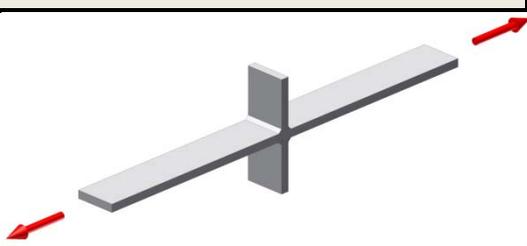
Bauteilserie DAST_1_E_AW	
Probekörpertyp	Quersteife
Blechdicke	12 mm
Werkstoff	S355J2+N
Nachbehandlung	AW
Spannungsverhältnis	R = -1,0
Bemerkung	-

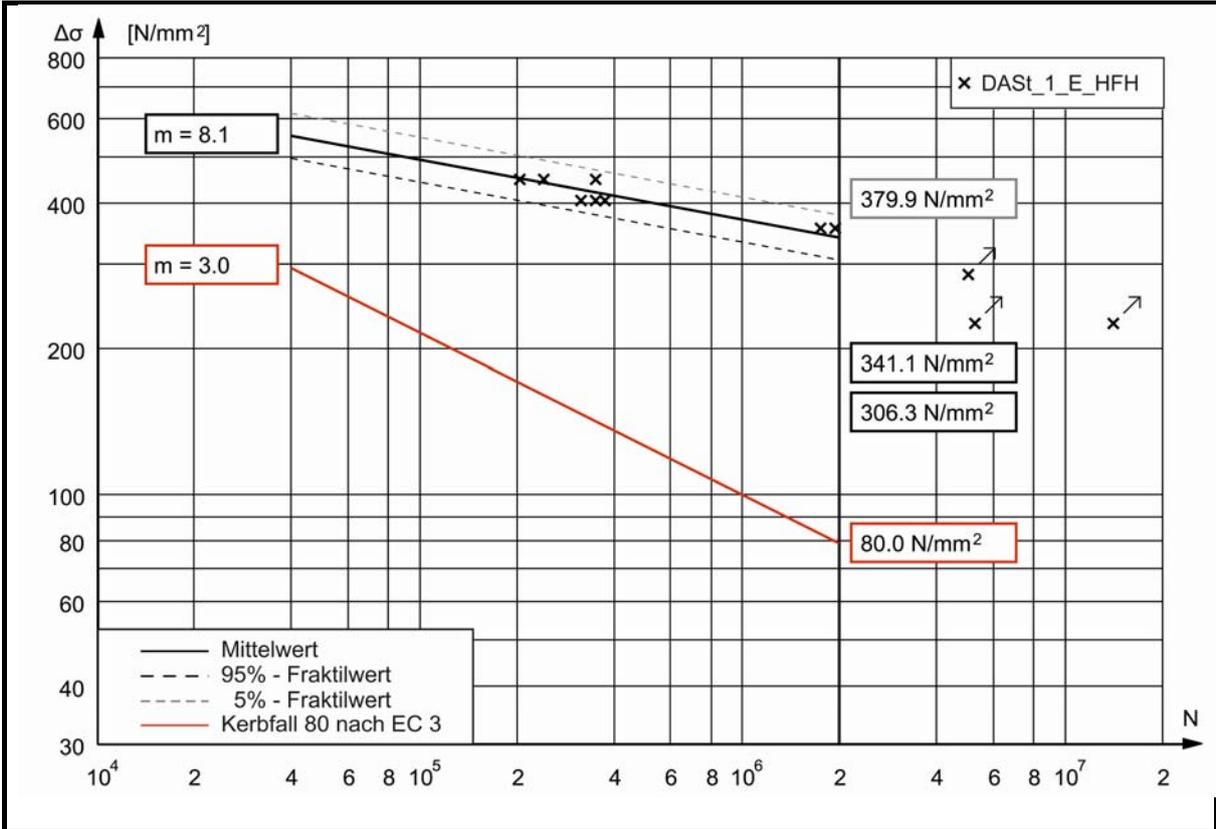


Versuchsergebnisse				
Probe	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N	Rissausgang	Bemerkung
1_AW_1	175	782.123	Nü	
1_AW_2	200	530.445	Nü	
1_AW_3	200	473.025	Nü	
1_AW_4	175	672.409	Nü	
1_AW_5	145	2.103.657	Nü	
1_AW_6	145	1.382.902	Nü	
1_AW_7	175	548.278	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
1_AW_8	145	1.761.494	Nü	

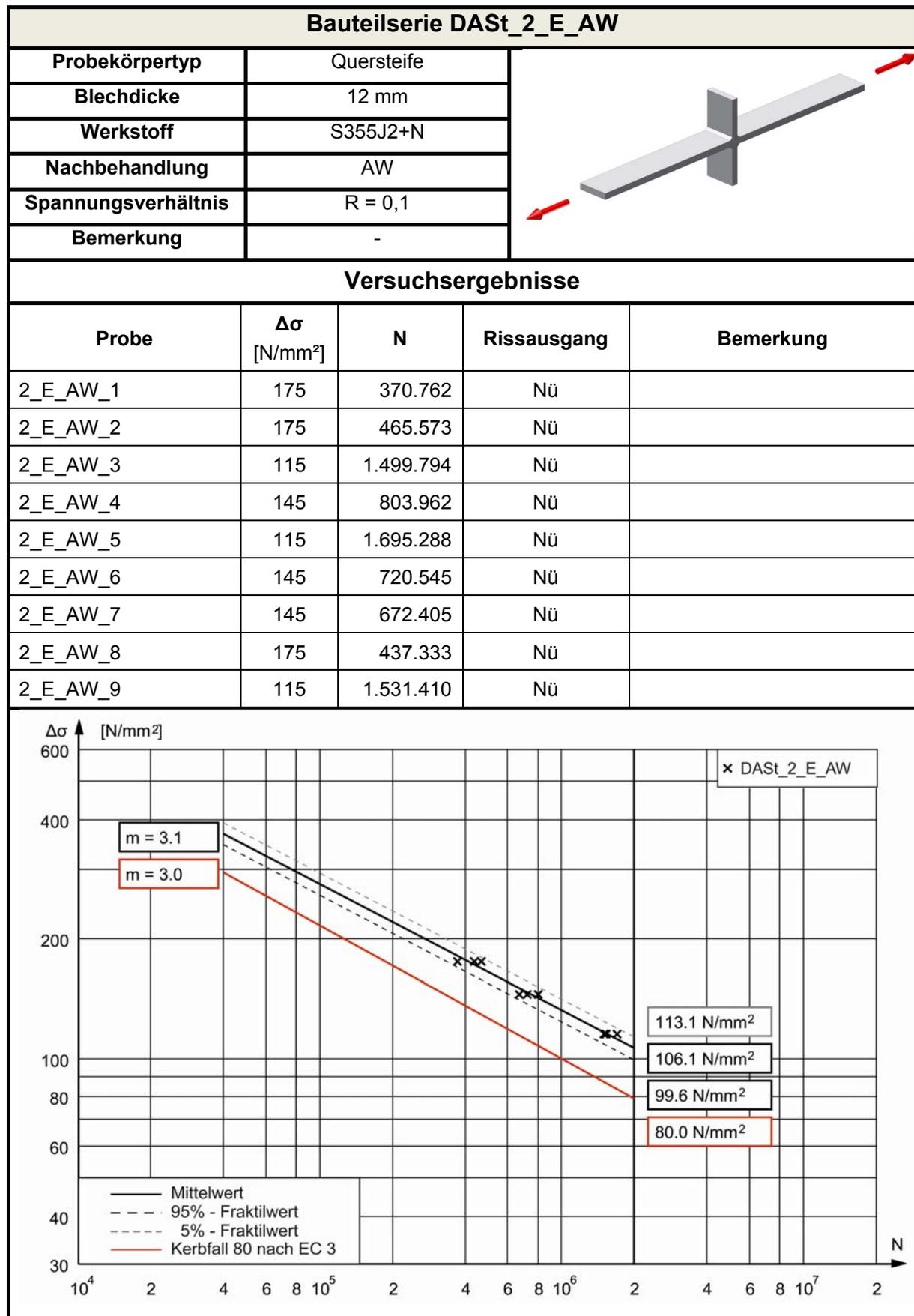


C.4. Versuchsergebnisse Serie DAST_1_E_HFH

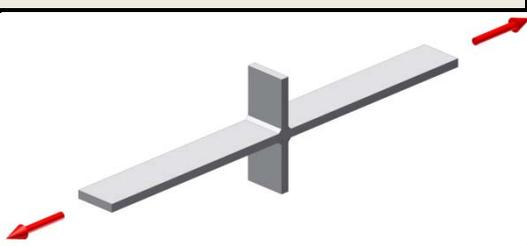
Bauteilserie DAST_1_E_HFH				
Probekörpertyp	Quersteife			
Blechdicke	12 mm			
Werkstoff	S355J2+N			
Nachbehandlung	HFH			
Spannungsverhältnis	R = -1,0			
Bemerkung	-			
Versuchsergebnisse				
Probe	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N	Rissausgang	Bemerkung
1_H_1	285	5.000.000	-	Durchläufer
1_H_2	405	317.590	GM	
1_H_3	450	203.413	Nü	
1_H_4	355	1.749.376	Nü	tailliert
1_H_5	225	14.167.185	GM	Durchläufer
1_P_1	450	241.947	Nü	talliert
1_P_2	405	374.533	GM	tailliert
1_P_3	450	351.186	Nü	
1_P_4	355	1.932.574	Nü	tailliert
1_P_5	225	5.260.595	-	Durchläufer
1_P_6	405	351.161	Nü	talliert

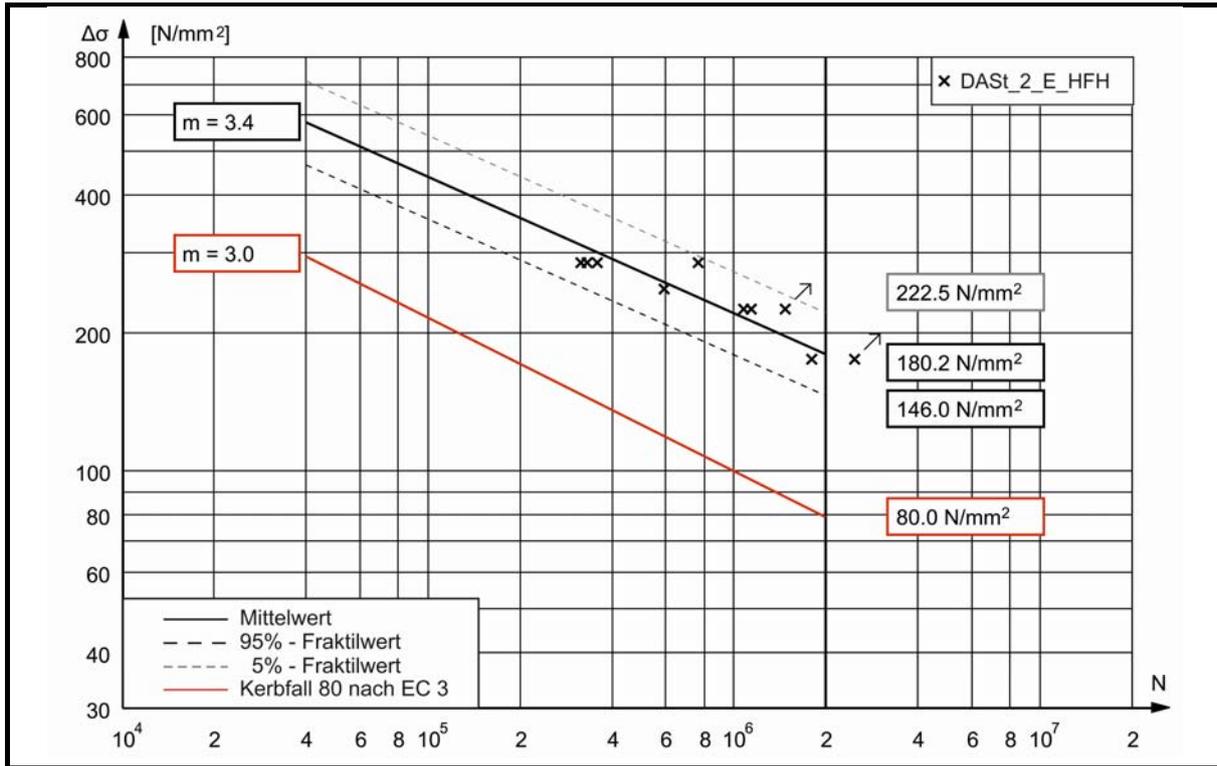


C.5. Versuchsergebnisse Serie DAST_2_E_AW

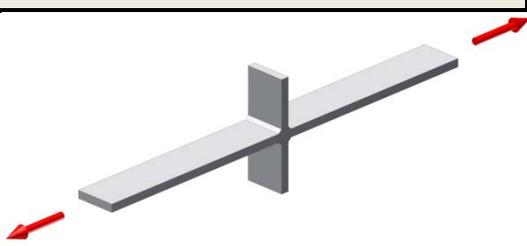


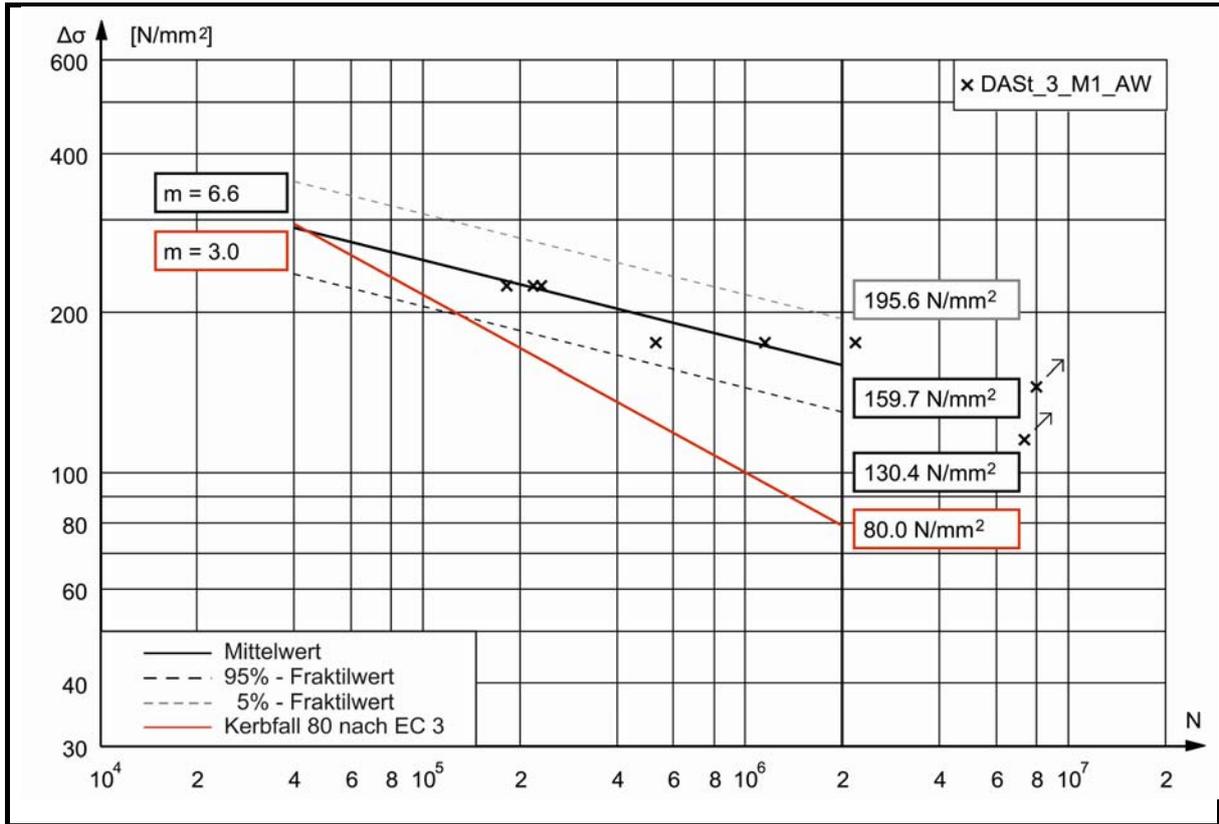
C.6. Versuchsergebnisse Serie DAST_2_E_HFH

Bauteilserie DAST_2_E_HFH				
Probekörpertyp	Quersteife			
Blechdicke	12 mm			
Werkstoff	S355J2+N			
Nachbehandlung	HFH			
Spannungsverhältnis	R = 0,1			
Bemerkung	-			
Versuchsergebnisse				
Probe	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N	Rissausgang	Bemerkung
2_E_H_1	225	1.136.237	Nü	
2_E_H_2	175	2.493.705	GM	Riss im Einspannbereich / Durchläufer Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
2_E_H_3	225	1.079.403	Nü	
2_E_H_4	285	331.682	Nü	
2_E_H_5	250	69.252*	Nü	3 x Versuchsabbruch, Maschinenfehler → Nicht berücksichtigt
2_E_H_6	285	317.653	Nü	
2_E_P_1	225	1.137.802	Nü	
2_E_P_2	175	1.795.257	Nü	
2_E_P_3	225	1.475.788	GM	Riss im Einspannbereich / Durchläufer
2_E_P_4	285	356.446	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
2_E_P_5	250	593.698	Nü	
2_E_P_6	285	761.835	Nü	

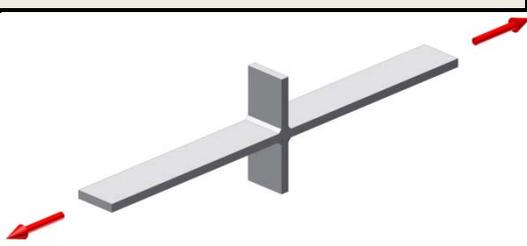


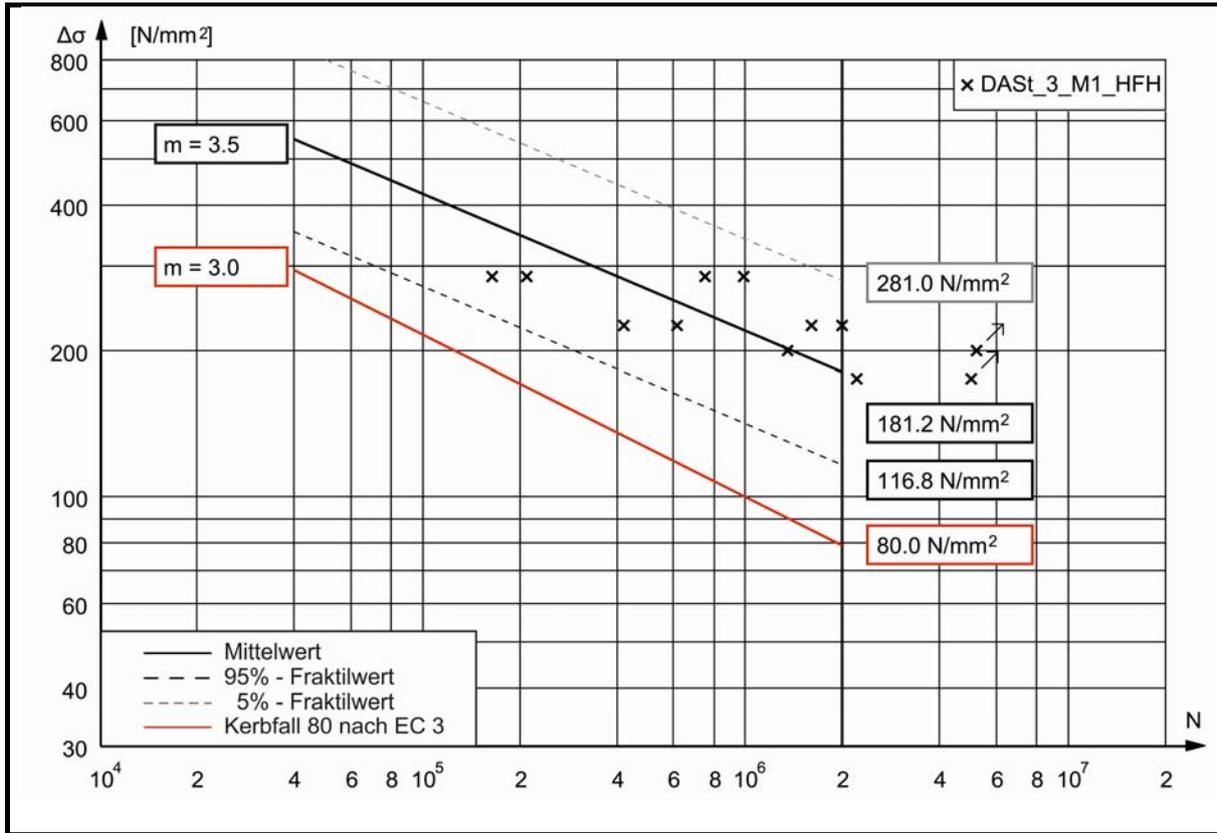
C.7. Versuchsergebnisse Serie DAST_3_M1_AW

Bauteilserie DAST_3_M1_AW					
Probekörpertyp	Quersteife				
Blechdicke	12 mm				
Werkstoff	S355J2+N				
Nachbehandlung	AW				
Spannungsverhältnis	R = 0,1				
Bemerkung	-				
Versuchsergebnisse					
Probe	Vorbelastung $\Delta\sigma$ [N/mm ²] / N	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N	Rissausgang	Bemerkung
3_M1_AW_1	402 / 100	175	1.150.527	Nü	
3_M1_AW_2	402 / 100	145	8.000.000	-	Durchläufer
3_M1_AW_3	402 / 100	115	7.369.647	-	Durchläufer
3_M1_AW_4	402 / 100	225	234.141	Nü	
3_M1_AW_5	402 / 100	175	2.187.938	Nü	
3_M1_AW_6	402 / 100	225	182.949	Nü	
3_M1_AW_7	402 / 100	175	528.034	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
3_M1_AW_8	402 / 100	225	220.775	Nü	

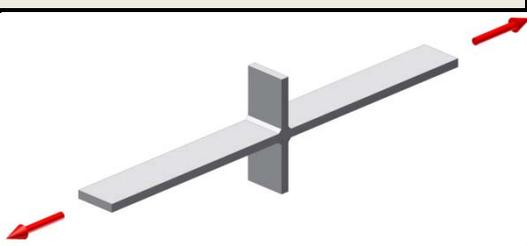


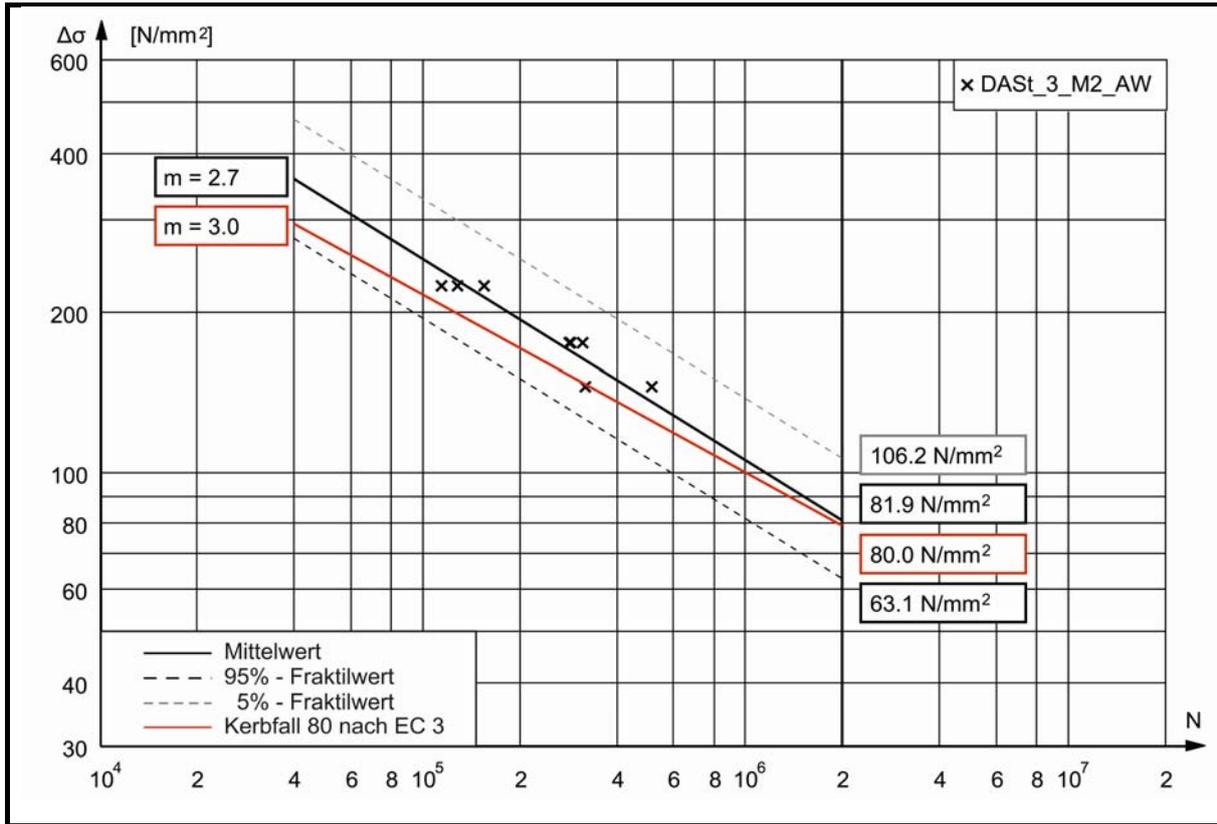
C.8. Versuchsergebnisse Serie DAST_3_M1_HFH

Bauteilserie DAST_3_M1_HFH					
Probekörpertyp	Quersteife				
Blechdicke	12 mm				
Werkstoff	S355J2+N				
Nachbehandlung	HFH				
Spannungsverhältnis	R = 0,1				
Bemerkung	-				
Versuchsergebnisse					
Probe	Vorbelastung $\Delta\sigma$ [N/mm ²] / N	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N	Rissausgang	Bemerkung
3_M1_H_1	402 / 100	175	5.000.00 0	-	Durchläufer
3_M1_H_2	450 / 100	175	1.190.67 3		Test Vorbelastung / nicht berücksichtigt
3_M1_H_3	402 / 100	285	164.393	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
3_M1_H_4	402 / 100	225	613.876	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
3_M1_H_5	402 / 100	285	209.434	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
3_M1_H_6	402 / 100	225	421.399	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
3_M1_H_7	402 / 100	200	1.347.78 2	Nü	
3_M1_P_1	402 / 100	175	2.221.67 4	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
3_M1_P_2	450 / 100	175	746.081		Test Vorbelastung / nicht berücksichtigt
3_M1_P_3	402 / 100	285	992.201	Nü	
3_M1_P_4	402 / 100	225	1.610.89 0	Nü	
3_M1_P_5	402 / 100	285	753.701	Nü	
3_M1_P_6	402 / 100	225	2.001.25 5	Nü	
3_M1_P_7	402 / 100	200	5.211.30 7	-	Durchläufer

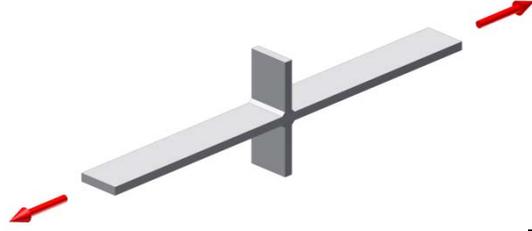


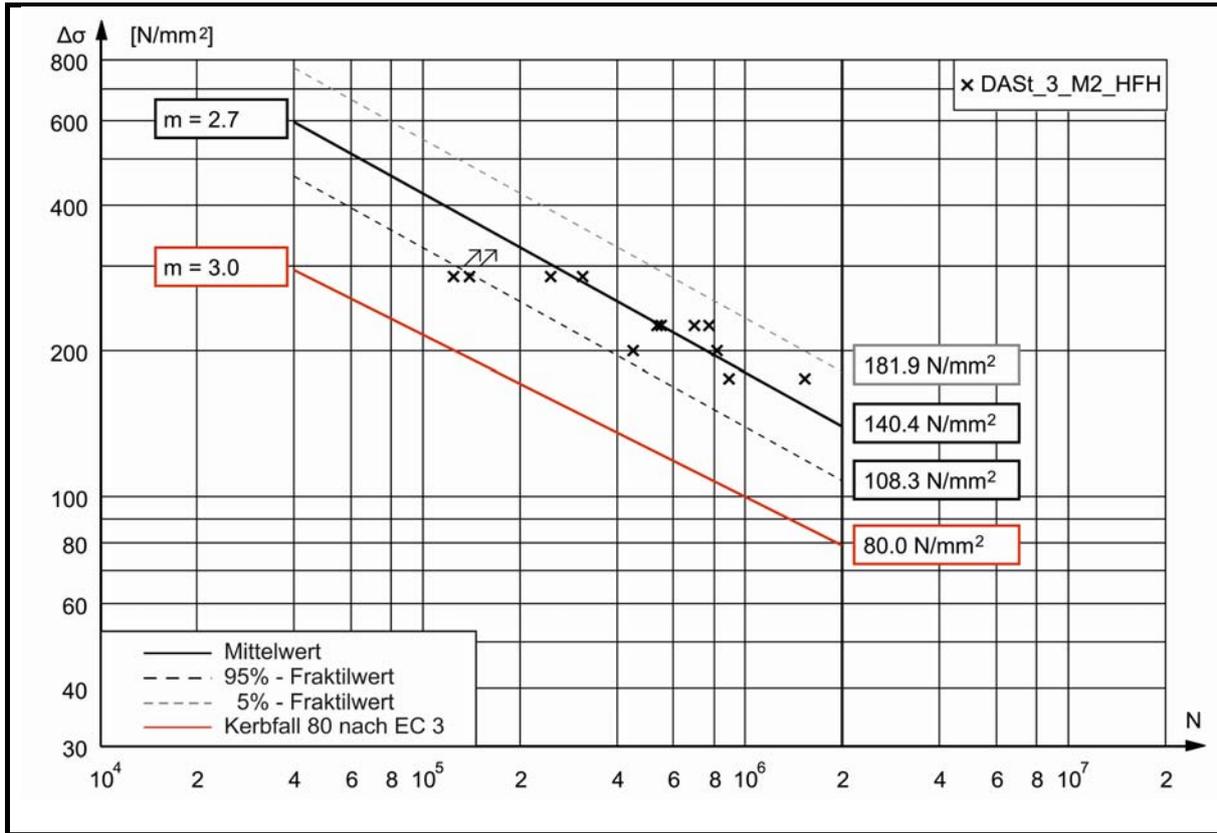
C.9. Versuchsergebnisse Serie DAST_3_M2_AW

Bauteilserie DAST_3_M2_AW					
Probekörpertyp	Quersteife				
Blechdicke	12 mm				
Werkstoff	S355J2+N				
Nachbehandlung	AW				
Spannungsverhältnis	R = 0,1				
Bemerkung	-				
Versuchsergebnisse					
Probe	Vorbelastung $\Delta\sigma$ [N/mm ²] / N	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N	Rissausgang	Bemerkung
4_M2_AW_1	- 402 / 100	145	511.701	Nü	
4_M2_AW_2	- 402 / 100	145	320.067	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
4_M2_AW_3	- 402 / 100	225	114.517	Nü	
4_M2_AW_4	- 402 / 100	175	312.444	Nü	
4_M2_AW_5	- 402 / 100	225	154.669	Nü	
4_M2_AW_6	- 402 / 100	175	287.734	Nü	
4_M2_AW_7	- 402 / 100	175	283.847	Nü	
4_M2_AW_8	- 402 / 100	225	128.726	Nü	

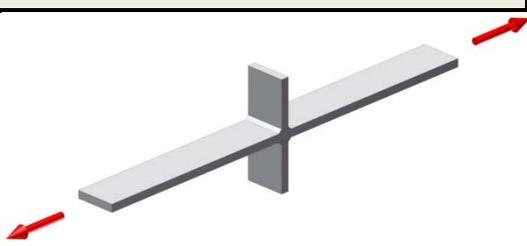


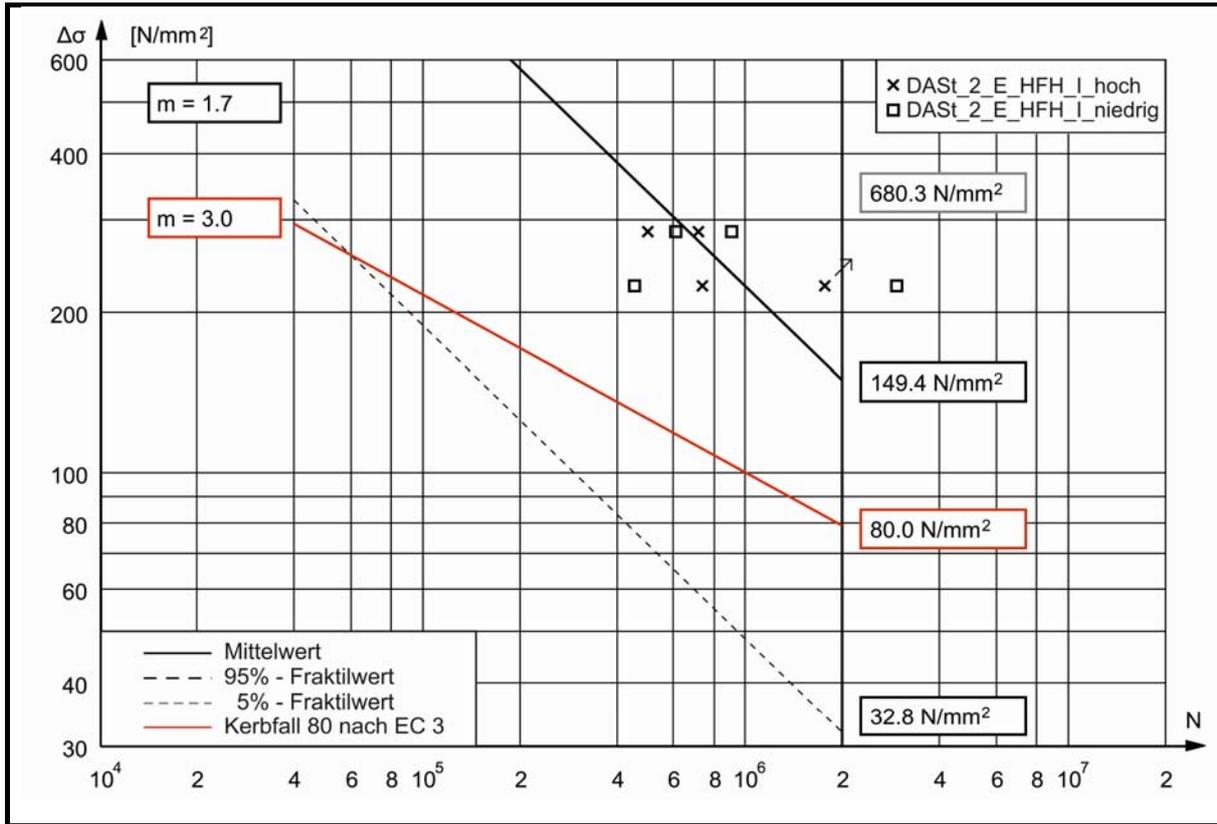
C.10. Versuchsergebnisse Serie DAST_3_M2_HFH

Bauteilserie DAST_3_M2_HFH					
Probekörpertyp	Quersteife				
Blechdicke	12 mm				
Werkstoff	S355J2+N				
Nachbehandlung	HFH				
Spannungsverhältnis	R = 0,1				
Bemerkung	-				
Versuchsergebnisse					
Probe	Vorbelastung $\Delta\sigma$ [N/mm ²] / N	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N	Rissausgang	Bemerkung
4_M2_H_1	- 402 / 100	175	1.526.237	Nü	
4_M2_H_2	- 402 / 100	225	695.766	Nü	
4_M2_H_3	- 402 / 100	285	249.503	Nü	
4_M2_H_4	- 402 / 100	200	450.146	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
4_M2_H_5	- 402 / 100	225	532.954	Nü	
4_M2_H_6	- 402 / 100	285	312.801	Nü	
4_M2_P_1	- 402 / 100	175	894.066	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
4_M2_P_2	- 402 / 100	225	770.271	Nü	
4_M2_P_3	- 402 / 100	285	139.114	Nü	Nach Vorbelastung gerichtet, Durchläufer
4_M2_P_4	- 402 / 100	200	819.387	Nü	
4_M2_P_5	- 402 / 100	225	550.568	Nü	
4_M2_P_6	- 402 / 100	285	124.549	Nü	Nach Vorbelastung gerichtet, Durchläufer

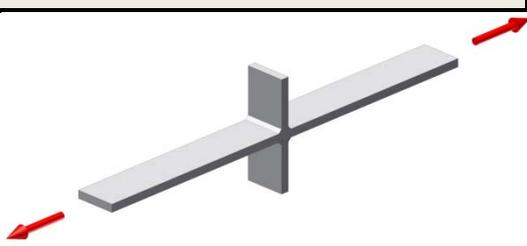


C.11. Versuchsergebnisse Serie DAST_2_E_HFH_I_hoch/niedrig

Bauteilserie DAST_2_E_HFH_I_hoch/niedrig				
Probekörpertyp	Quersteife			
Blechdicke	12 mm			
Werkstoff	S355J2+N			
Nachbehandlung	HFH			
Spannungsverhältnis	R = 0,1			
Bemerkung	-			
Versuchsergebnisse				
Probe	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N	Rissausgang	Bemerkung
5_V_AW_1_I_hoch	225	737.270	Nü	I_hoch
5_V_AW_2_I_hoch	225	1.767.767	GM	I_hoch, Riss im Einspannbereich / Durchläufer
5_V_AW_3_I_hoch	285	498.975	Nü	I_hoch
5_V_AW_4_I_hoch	285	713.561	Nü	I_hoch
5_V_AW_5_I_niedrig	225	2.951.578	Nü	I_niedrig
5_V_AW_6_I_niedrig	225	453.801	Nü	I_niedrig, Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
5_V_AW_7_I_niedrig	285	608.231	Nü	I_niedrig
5_V_AW_8_I_niedrig	285	907.882	Nü	I_niedrig



C.12. Versuchsergebnisse Serie DAST_5_E_V_HFH

Bauteilserie DAST_5_E_V_HFH					
Probekörpertyp	Quersteife				
Blechdicke	12 mm				
Werkstoff	S355J2+N				
Nachbehandlung	HFH				
Spannungsverhältnis	R = 0,1				
Bemerkung	-				
Versuchsergebnisse					
Probe	Vorbelastung $\Delta\sigma$ [N/mm ²] / N	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N	Rissausgang	Bemerkung
5_V_H_1	145 / 624.300	145	6.000.00 0	-	Durchläufer
5_V_H_2	175 / 348.511	175	227.268	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
5_V_H_3	225 / 159.907	225	306.772	Nü	
5_V_H_4	145 / 624.300	145	4.936.10 1	-	Durchläufer
5_V_H_5	175 / 348.511	175	186.769	Nü	Versagensort anhand Bruchfläche festgestellt
5_V_H_6					Anriss beim Anschwingen / nicht berücksichtigt
5_V_H_7					Anriss beim Anschwingen / nicht berücksichtigt
5_V_P_1	145 / 624.300	285	183.866	Nü	Vorlastniveau \neq Prüflastniveau / Durchläufer
5_V_P_2	175 / 348.511	175	48.928	Nü	Anriss aus Vorbelastung nicht detektiert / nicht berücksichtigt und als Durchläufer markiert
5_V_P_3	225 / 159.907	225	41.515	Nü	Anriss aus Vorbelastung nicht detektiert / nicht berücksichtigt und als Durchläufer markiert
5_V_P_4	145 / 624.300	145	2.874.20 9	Nü	
5_V_P_5	175 / 348.511	175	2.340.95 3	Nü	
5_V_P_6	225 / 159.907	225	89.161	Nü	

Anhang D

Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse der Trägerversuche

D.1.	Übersicht der geprüften Versuchsserien der Träger.....	296
D.2.	Versuchsprotokolle der unter Wechsellast beanspruchten Trägerserie T1	297
D.3.	Ergebnisse der unter Wechsellast beanspruchten Trägerversuche T1	314
D.4.	Ergebnisse der zugschwellbeanspruchten Trägerversuche T2.....	315
D.5.	Bruchflächen ausgewählter Trägerversuche	316

Im Rahmen der nachfolgend dargestellten Dokumentation der durchgeführten Ermüdungsversuche werden zur Kennzeichnung des Behandlungszustandes und des Rissausgangsortes folgende Abkürzungen verwendet:

AW	unbehandelt / im Zustand „wie geschweißt“ (as welded)
HFH	Schweißnahtübergänge mit höherfrequenten Hämmerverfahren (HFH) nachbehandelt, zum Einsatz kamen das HiFIT-Verfahren (HiFIT) und das PIT-Verfahren (PIT)
HiFIT	Probekörper wurde HiFIT-behandelt
PIT	Probekörper wurde PIT-behandelt
GM	Grundmaterial
Nü	Nahtübergang (ursprüngliche Naht)
W	Rissausgang von Wurzel im Inneren des Probekörpers

D.1. Übersicht der geprüften Versuchsserien der Träger

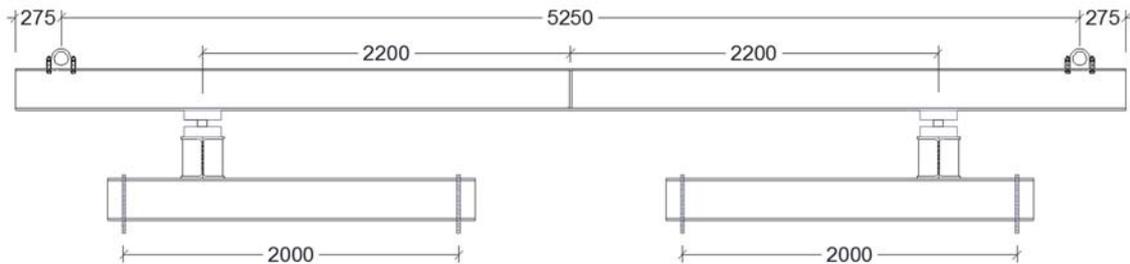
Kerbdetail	Serien- Bezeichnung	Behandlungs- zustand	Blechdicke [mm]	Werkstoff	Anzahl Versuche
Quersteife	DAS _t _T1	AW, PIT, HiFIT	HEA 260	S355J2+N	8
Quersteife	DAS _t _T2	AW, PIT, HiFIT	HEA 260	S355J2+N	18

D.2. Versuchsprotokolle der unter Wechsellast beanspruchten Trägerserie T1

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
---	--	---	--

Datenblatt Träger-Nr.:	T 1.1	Zustand:	PIT
------------------------	-------	----------	-----

Längsansicht:



1.) Geplante Spannungen und Dehnungen

Spannungsschwingbreite _{äußere Faser}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	280
Spannungsschwingbreite _{Steife}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	257
$W_{\text{Feldmitte}}$	W_F [mm]	5,9
W_{Kragarm}	W_K [mm]	10
Dehnungen _{äußere Faser}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1340
		+/- 670
Dehnungen _{Quersteife}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1200
		+/- 600

¹ DMS 1: UG Feldmitte ; DMS 2: OG zur Halle; DMS 3: OG zu Fenster

2.) Dynamische Belastung

Fliehkraft	F [kN]	40
Erregerfrequenz	f_R [1/sec]	33,7
Spannungsverhältnis	R [-]	-1
Prüffrequenz	F [Hz]	34,5

3.) Versagen

Erreichte Schwingspielzahl	N_B [-]	1.185.637
Versagensort	NÜ Höhe Steg an Steife → ungenügend weit behandelt	

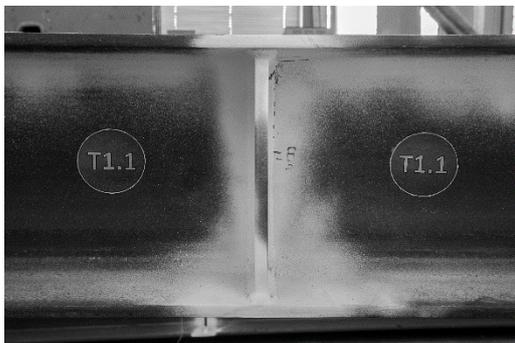


Foto Rissansicht frontal [3]

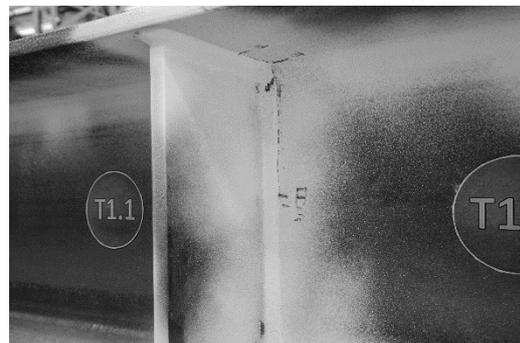
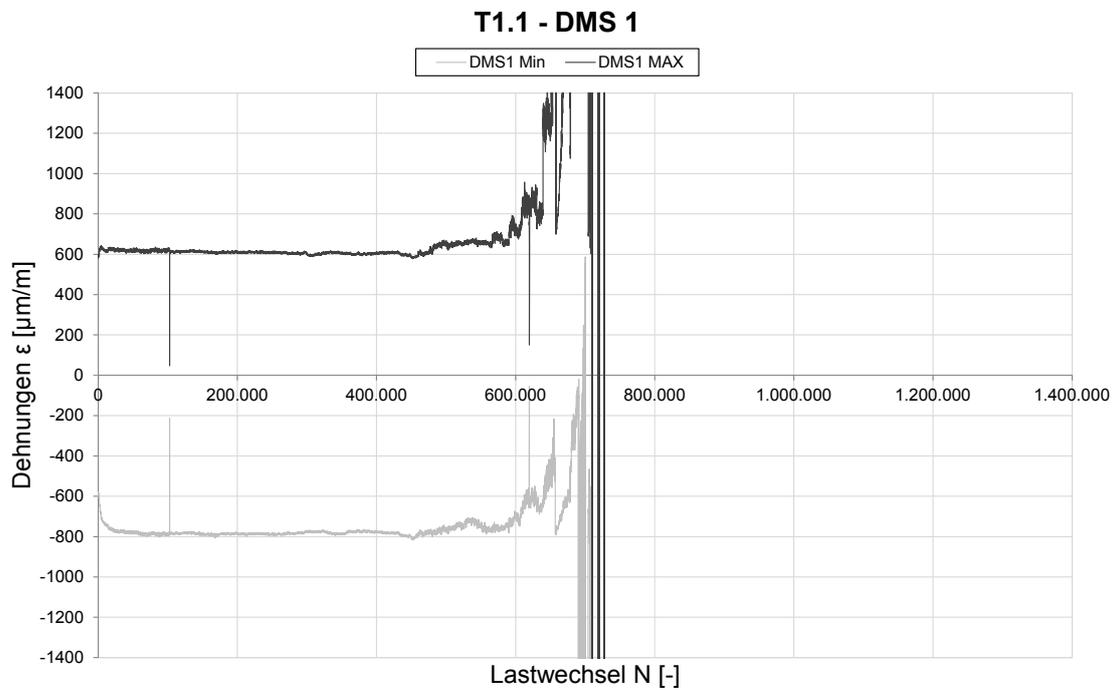


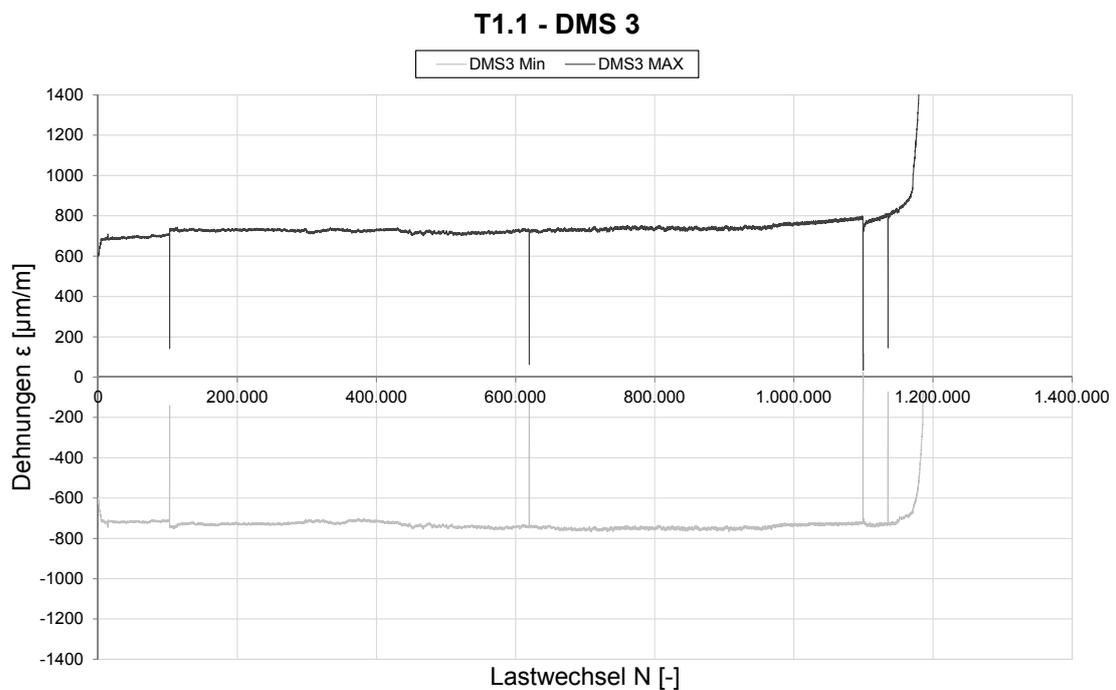
Foto Rissansicht isometrisch [3]

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T1.1	Zustand:	PIT

4.) Dehnungsverlauf



[3]

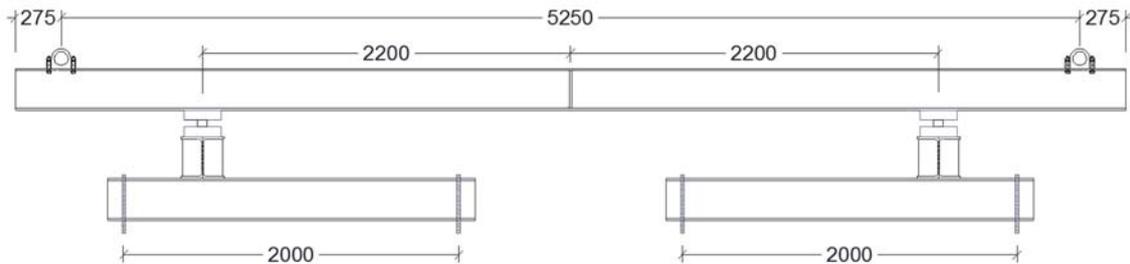


[3]

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
--	--	---	--

Datenblatt Träger-Nr.:	T 1.2	Zustand:	PIT
------------------------	-------	----------	-----

Längsansicht:



1.) Geplante Spannungen und Dehnungen

Spannungsschwingbreite _{äußere Faser}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	280
Spannungsschwingbreite _{Steife}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	257
$W_{\text{Feldmitte}}$	W_F [mm]	5,9
W_{Kragarm}	W_K [mm]	10
Dehnungen _{äußere Faser}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1660
		+/- 830
Dehnungen _{Quersteife}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1490
		+/- 740

¹ DMS 1: UG Feldmitte ; DMS 2: OG zur Halle; DMS 3: OG zu Fenster

2.) Dynamische Belastung

Fliehkraft	F [kN]	40
Erregerfrequenz	f_R [1/sec]	35
Spannungsverhältnis	R [-]	-1
Prüffrequenz	F [Hz]	35

3.) Versagen

Erreichte Schwingenspielzahl	N_B [-]	708.640
Versagensort	NÜ Höhe Steg an Steife → ungenügend weit behandelt	



Foto Rissansicht frontal [3]

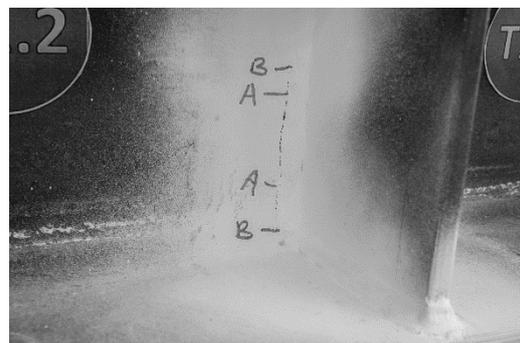
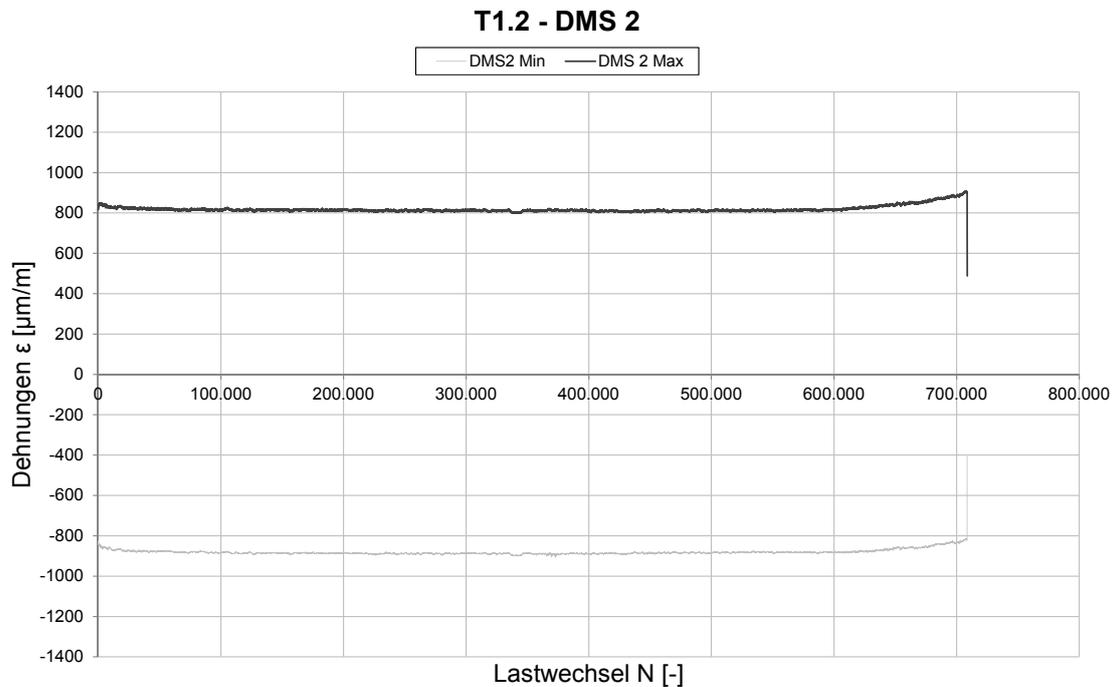
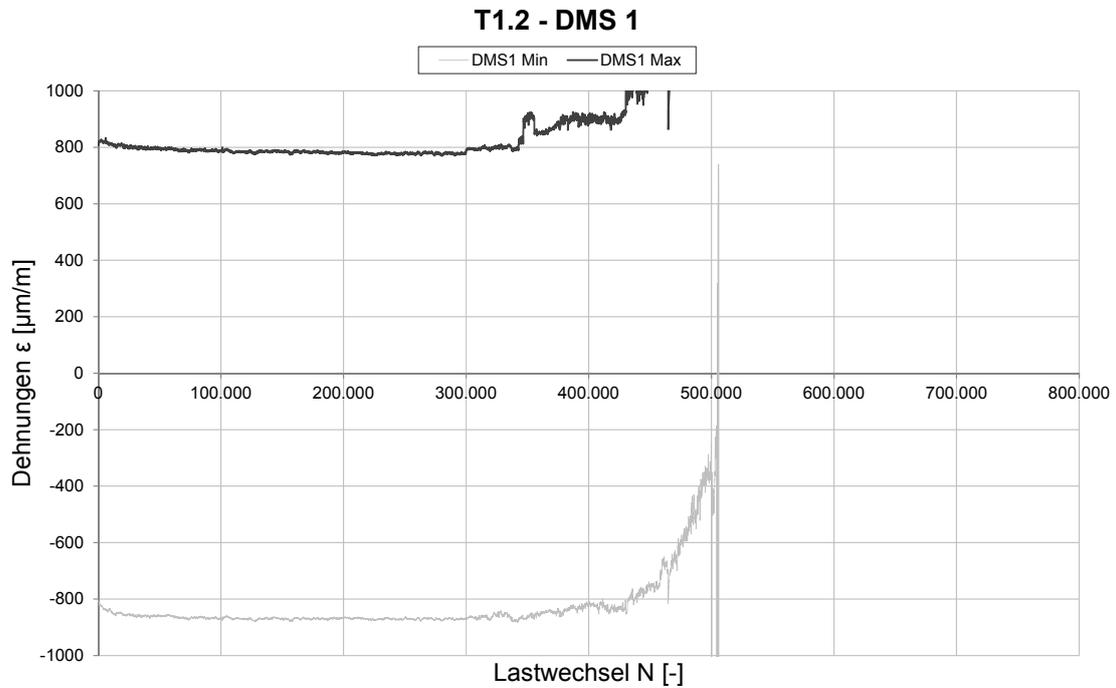


Foto Rissansicht isometrisch [3]

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T1.2	Zustand:	PIT

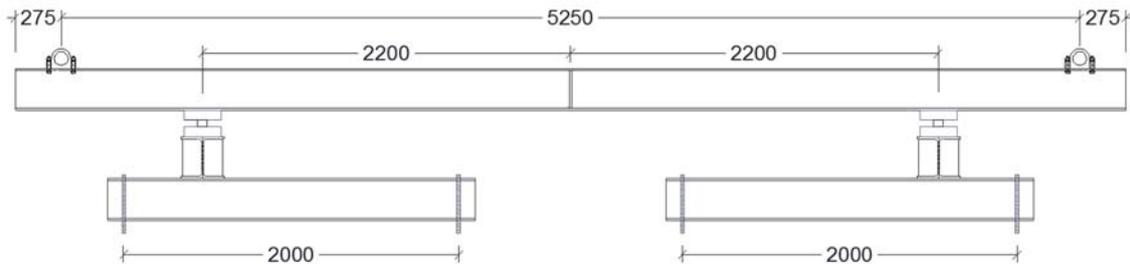
4.) Dehnungsverlauf



DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
---	--	---	--

Datenblatt Träger-Nr.:	T 1.3	Zustand:	PIT
------------------------	-------	----------	-----

Längsansicht:



1.) Geplante Spannungen und Dehnungen

Spannungsschwingbreite _{äußere Faser}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	280
Spannungsschwingbreite _{Steife}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	257
$W_{\text{Feldmitte}}$	W_F [mm]	5,9
W_{Kragarm}	W_K [mm]	10
Dehnungen _{äußere Faser}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1340
		+/- 670
Dehnungen _{Quersteife}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1200
		+/- 600

2.) Dynamische Belastung

Fliehkraft	F [kN]	40
Erregerfrequenz	f_R [1/sec]	33,7
Spannungsverhältnis	R [-]	-1
Prüffrequenz	F [Hz]	34,5

3.) Versagen

Erreichte Schwingspielzahl	N_B [-]	3.000.000
Versagensort	DL → kein Riss	

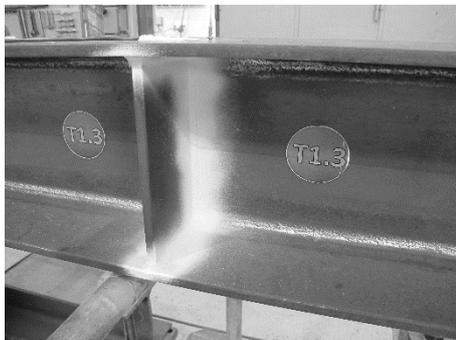


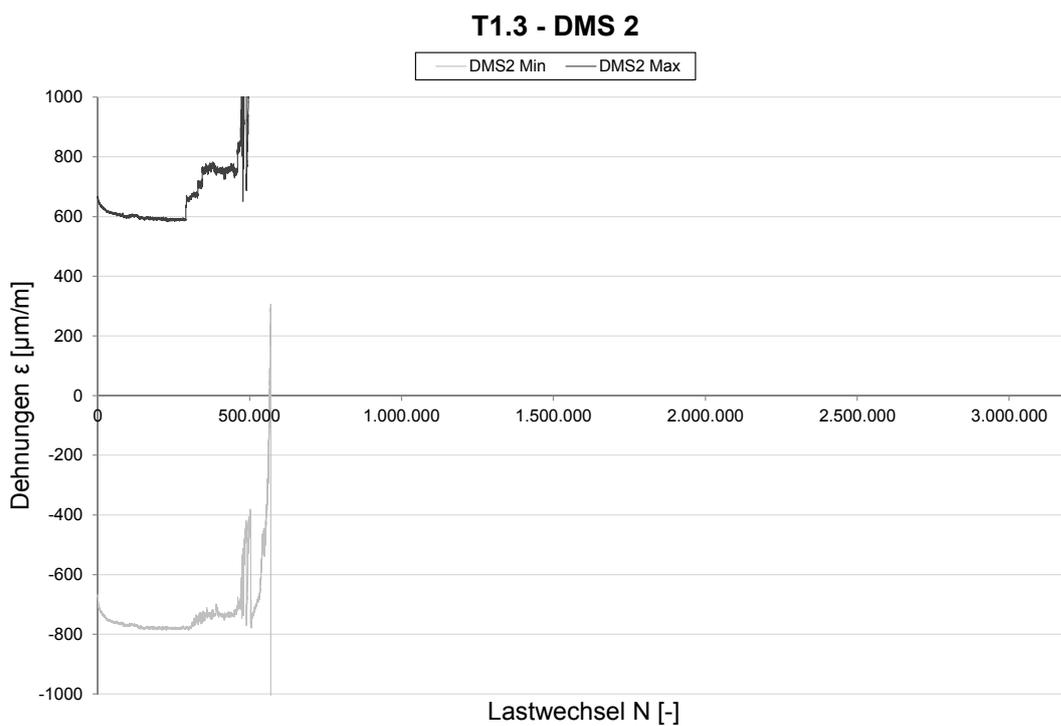
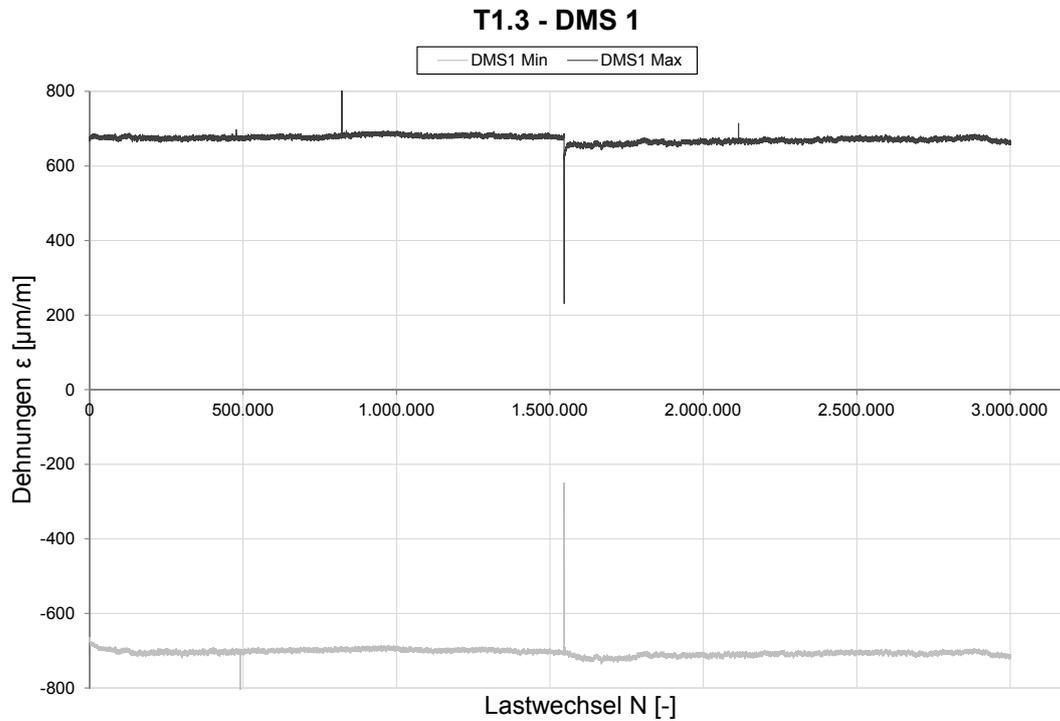
Foto Trägeransicht isometrisch [3]



Foto NÜ Quersteife (ohne Riss) isometrisch [3]

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T1.3	Zustand:	PIT

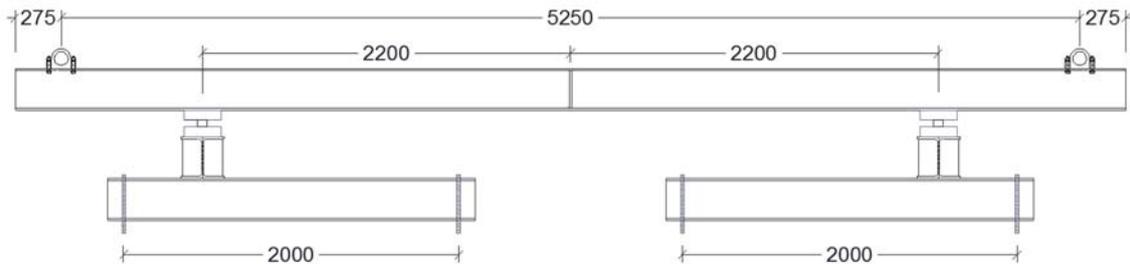
4.) Dehnungsverlauf



DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
---	--	---	--

Datenblatt Träger-Nr.:	T 1.4	Zustand:	HiFIT
------------------------	-------	----------	-------

Längsansicht:



1.) Geplante Spannungen und Dehnungen

Spannungsschwingbreite _{äußere Faser}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	280
Spannungsschwingbreite _{Steife}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	257
$W_{Feldmitte}$	W_F [mm]	5,9
$W_{Kragarm}$	W_K [mm]	10
Dehnungen _{äußere Faser}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1190
		+/- 520
Dehnungen _{Quersteife}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1070
		+/- 530

2.) Dynamische Belastung

Fliehkraft	F [kN]	40
Erregerfrequenz	f_R [1/sec]	33,7
Spannungsverhältnis	R [-]	-1
Prüffrequenz	F [Hz]	34,5

3.) Versagen

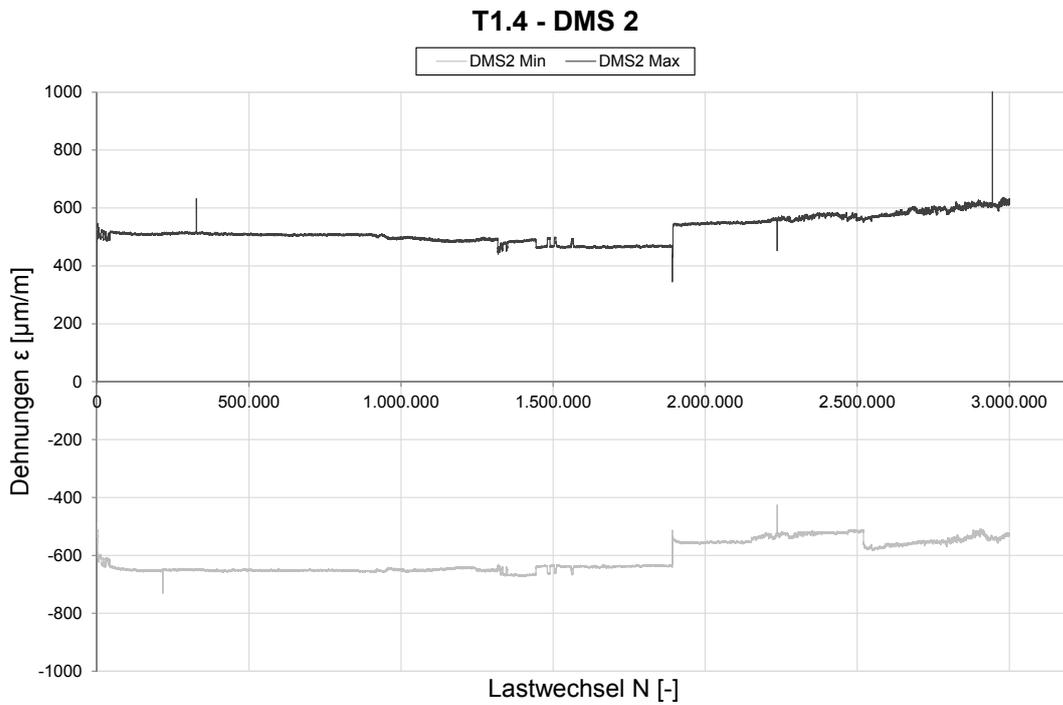
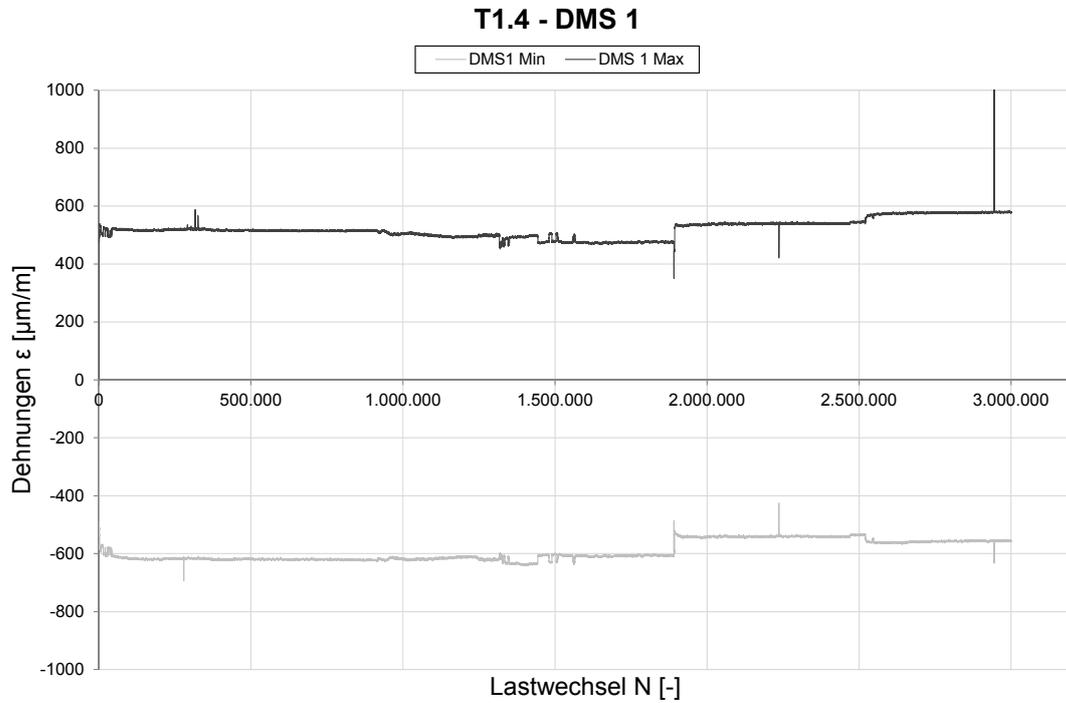
Erreichte Schwingspielzahl	N_B [-]	3.000.000
Versagensort	DL → kein Riss	



Foto der HFH-Nachbehandlung isometrische Ansicht [3]

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T1.4	Zustand:	HiFIT

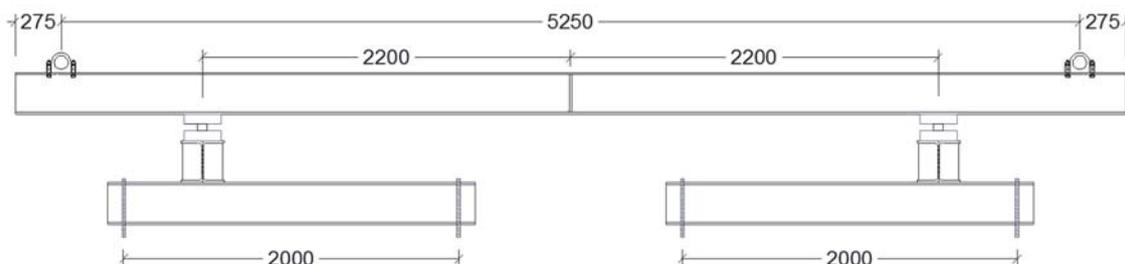
4.) Dehnungsverlauf



DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
--	--	---	--

Datenblatt Träger-Nr.:	T 1.5	Zustand:	HiFIT
------------------------	-------	----------	-------

Längsansicht:



1.) Geplante Spannungen und Dehnungen

Spannungsschwingbreite _{äußere Faser}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	280
Spannungsschwingbreite _{Steife}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	257
$W_{\text{Feldmitte}}$	W_F [mm]	5,9
W_{Kragarm}	W_K [mm]	10
Dehnungen _{äußere Faser}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1340
		+/- 670
Dehnungen _{Quersteife}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1200
		+/- 600

2.) Dynamische Belastung

Fliehkraft	F [kN]	40
Erregerfrequenz	f_R [1/sec]	33,7
Spannungsverhältnis	R [-]	-1
Prüffrequenz	F [Hz]	34,5

3.) Versagen

Erreichte Schwingspielzahl	N_B [-]	631.555
Versagensort	GM Walzträgergurt	

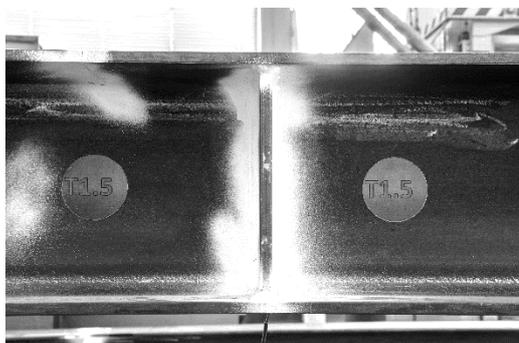


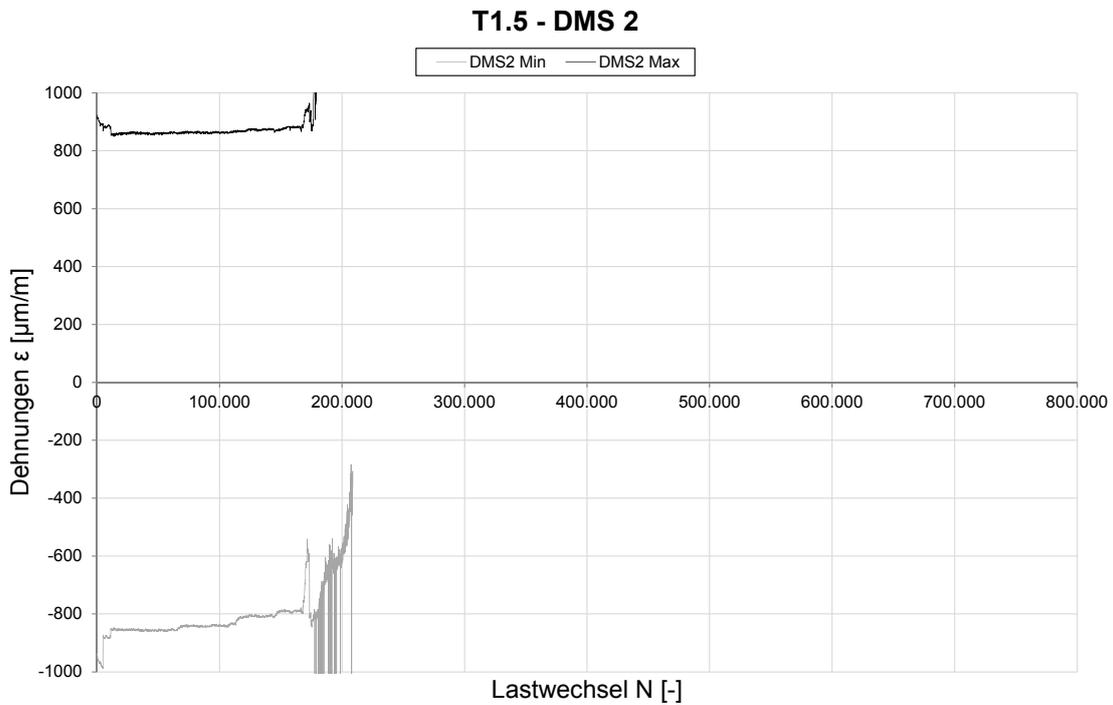
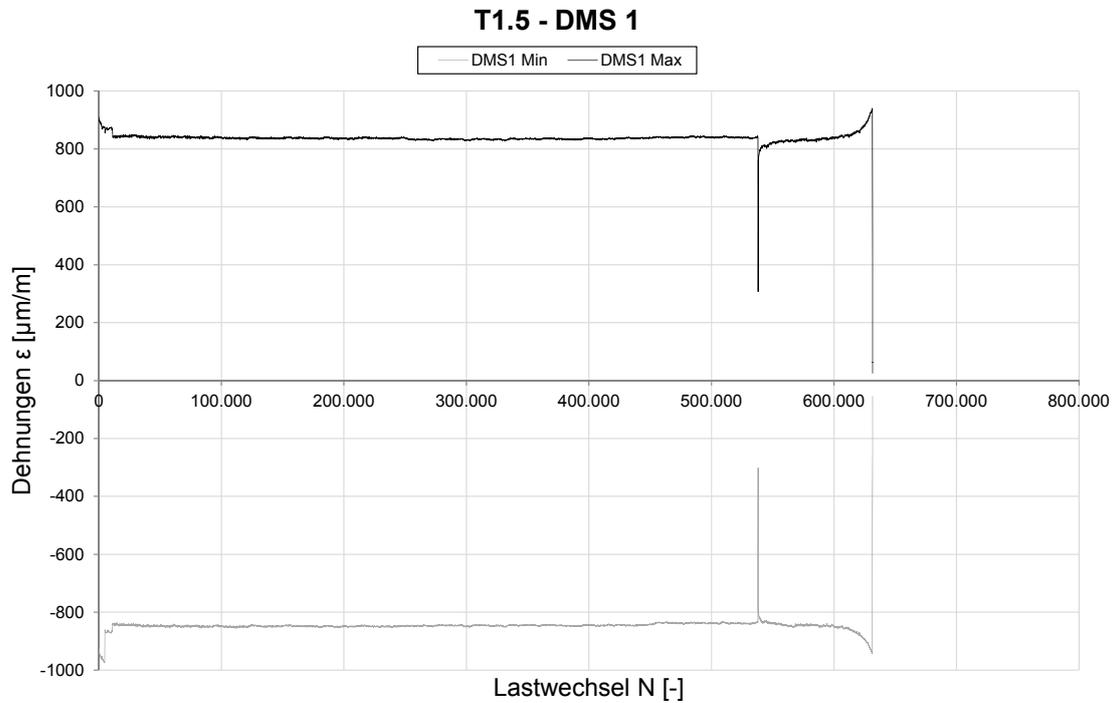
Foto Rissansicht frontal [3]



Foto Rissansicht isometrisch [3]

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T1.5	Zustand:	HiFIT

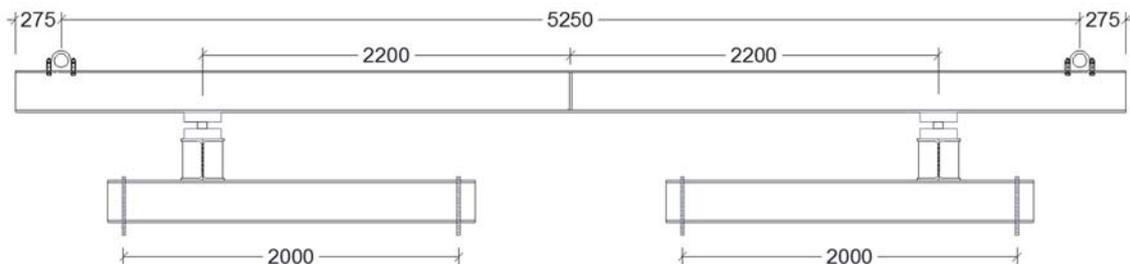
4.) Dehnungsverlauf



DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
--	--	---	--

Datenblatt Träger-Nr.:	T 1.6	Zustand:	HiFIT
------------------------	-------	----------	-------

Längsansicht:



1.) Geplante Spannungen und Dehnungen

Spannungsschwingbreite _{äußere Faser}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	280
Spannungsschwingbreite _{Steife}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	257
$W_{\text{Feldmitte}}$	W_F [mm]	5,9
W_{Kragarm}	W_K [mm]	10
Dehnungen _{äußere Faser}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1190
		+/- 520
Dehnungen _{Quersteife}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1070
		+/- 530

2.) Dynamische Belastung

Fliehkraft	F [kN]	40
Erregerfrequenz	f_R [1/sec]	33,7
Spannungsverhältnis	R [-]	-1
Prüffrequenz	F [Hz]	34,5

3.) Versagen

Erreichte Schwingspielzahl	N_B [-]	1.025.925
Versagensort	NÜ Quersteife Untergurt	

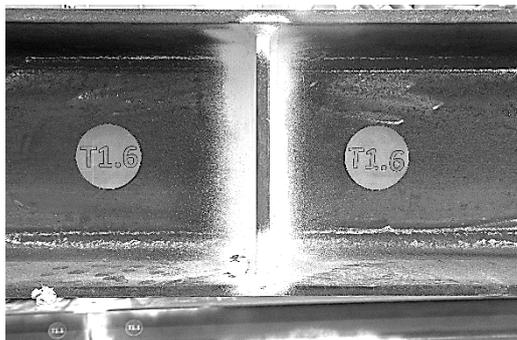


Foto Rissansicht frontal [3]

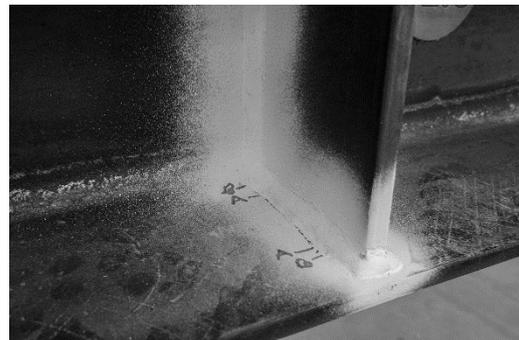
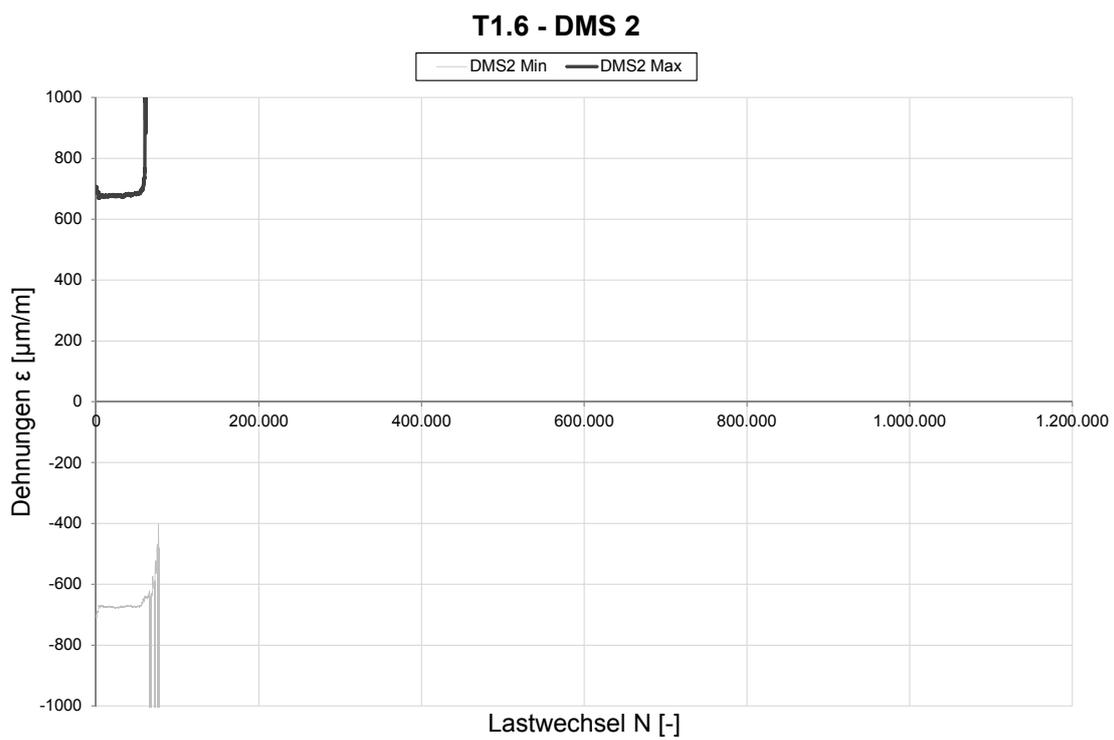
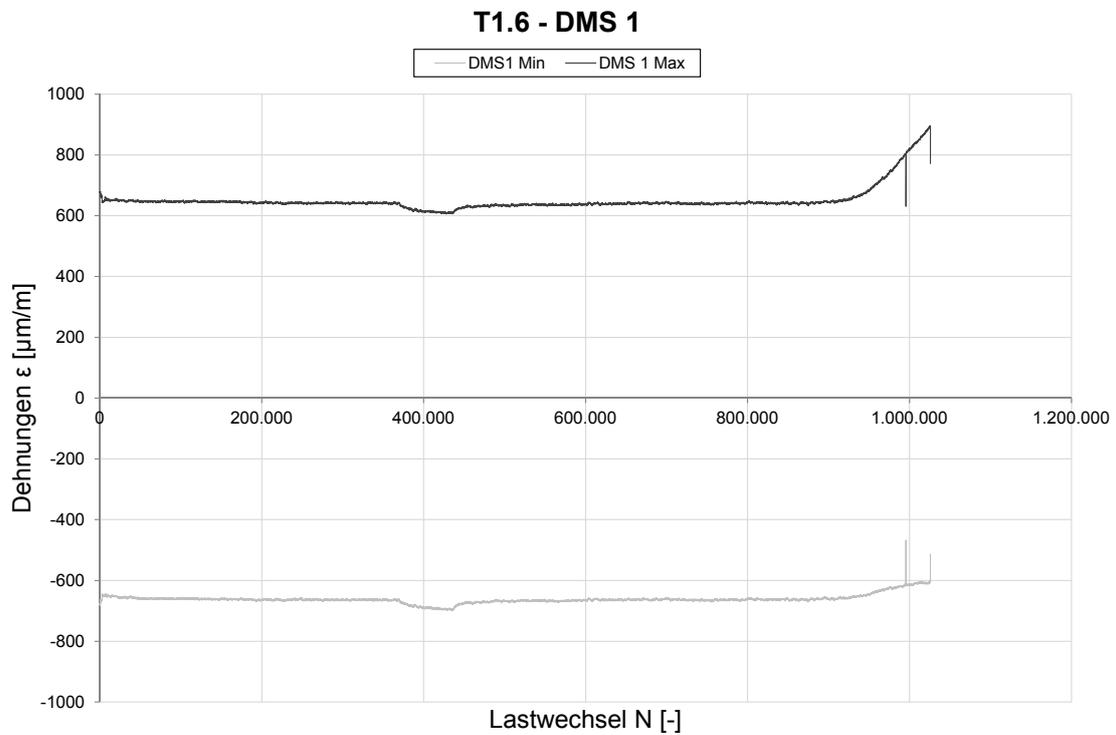


Foto Rissansicht isometrisch [3]

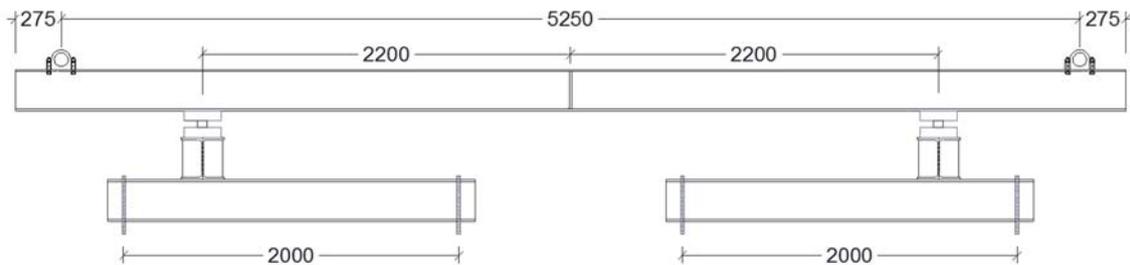
DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T1.6	Zustand:	HiFIT

4.) Dehnungsverlauf



DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	VT 1	Zustand:	unbehandelt

Längsansicht:



1.) Geplante Spannungen und Dehnungen

Spannungsschwingbreite _{äußere Faser}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	280
Spannungsschwingbreite _{Steife}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	257
$W_{\text{Feldmitte}}$	W_F [mm]	5,9
W_{Kragarm}	W_K [mm]	10
Dehnungen _{äußere Faser}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1190
		+/- 680
Dehnungen _{Quersteife}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1070
		+/- 612

2.) Dynamische Belastung

Fliehkraft	F [kN]	40
Erregerfrequenz	f_R [1/sec]	33,7
Spannungsverhältnis	R [-]	-1
Prüffrequenz	F [Hz]	34

3.) Versagen

Erreichte Schwingspielzahl	N_B [-]	250.000
Versagensort	NÜ Quersteife	

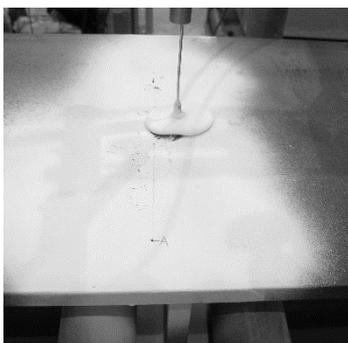


Foto Rissansicht Draufsicht

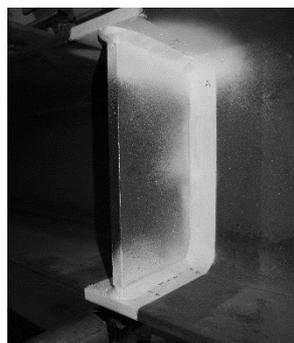
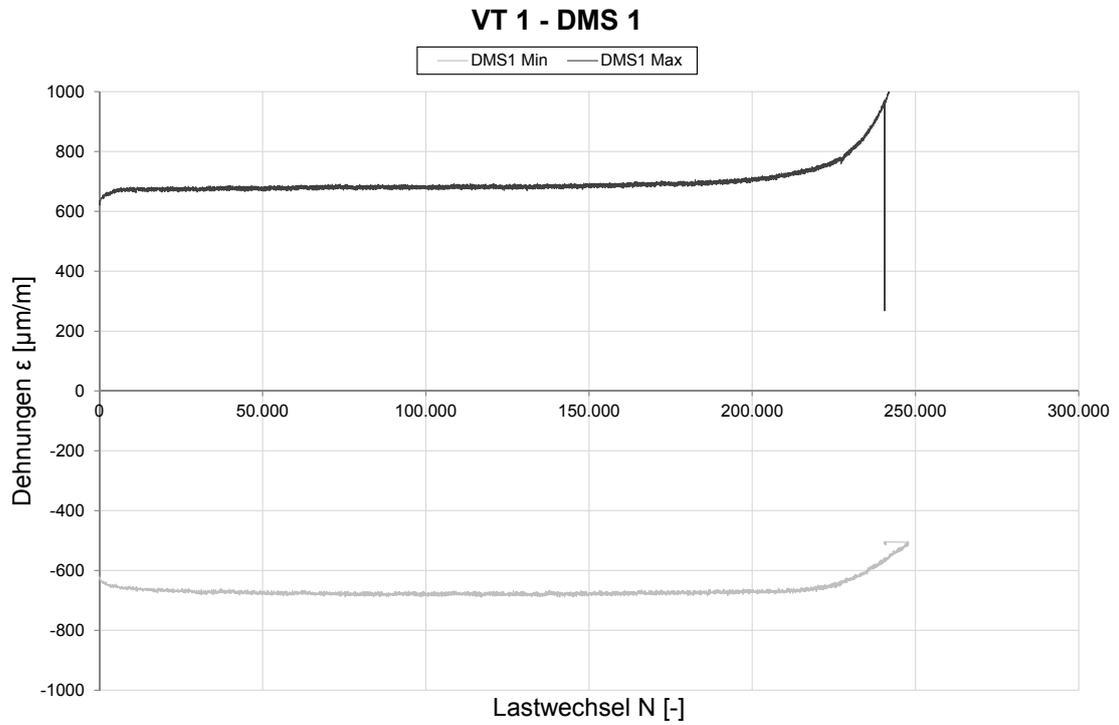


Foto Rissansicht isometrisch [3]



DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	VT 1	Zustand:	unbehandelt

4.) Dehnungsverlauf

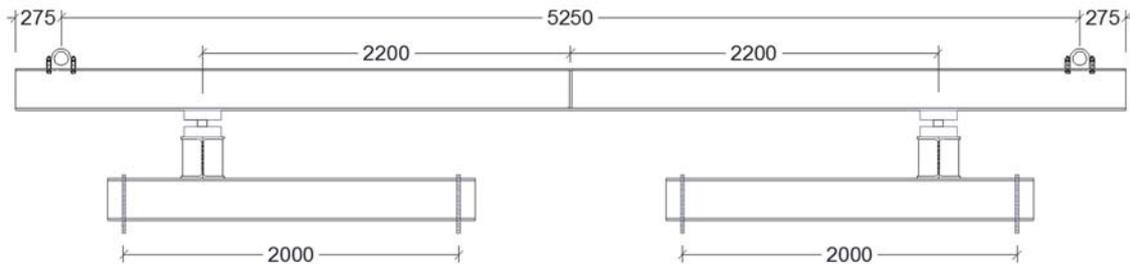


[3]

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
---	--	---	--

Datenblatt Träger-Nr.:	VT 2	Zustand:	unbehandelt
------------------------	------	----------	-------------

Längsansicht:



1.) Geplante Spannungen und Dehnungen

Spannungsschwingbreite _{äußere Faser}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	222
Spannungsschwingbreite _{Steife}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	200
$W_{\text{Feldmitte}}$	W_F [mm]	5,9
W_{Kragarm}	W_K [mm]	10
Dehnungen _{äußere Faser}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	1160
		+/- 530
Dehnungen _{Quersteife}	$\Delta\varepsilon$ [µm/m]	950
		+/- 475

2.) Dynamische Belastung

Fliehkraft	F [kN]	40
Erregerfrequenz	f_R [1/sec]	
Spannungsverhältnis	R [-]	-1
Prüffrequenz	F [Hz]	33,05

3.) Versagen

Erreichte Schwingspielzahl	N_B [-]	614.070
Versagensort	Nü Quersteife	

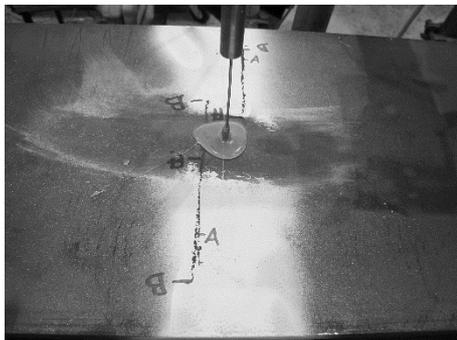


Foto Rissansicht Draufsicht [3]

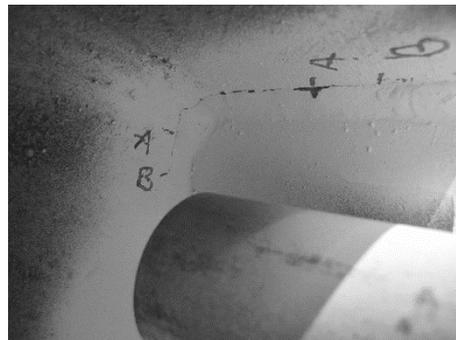
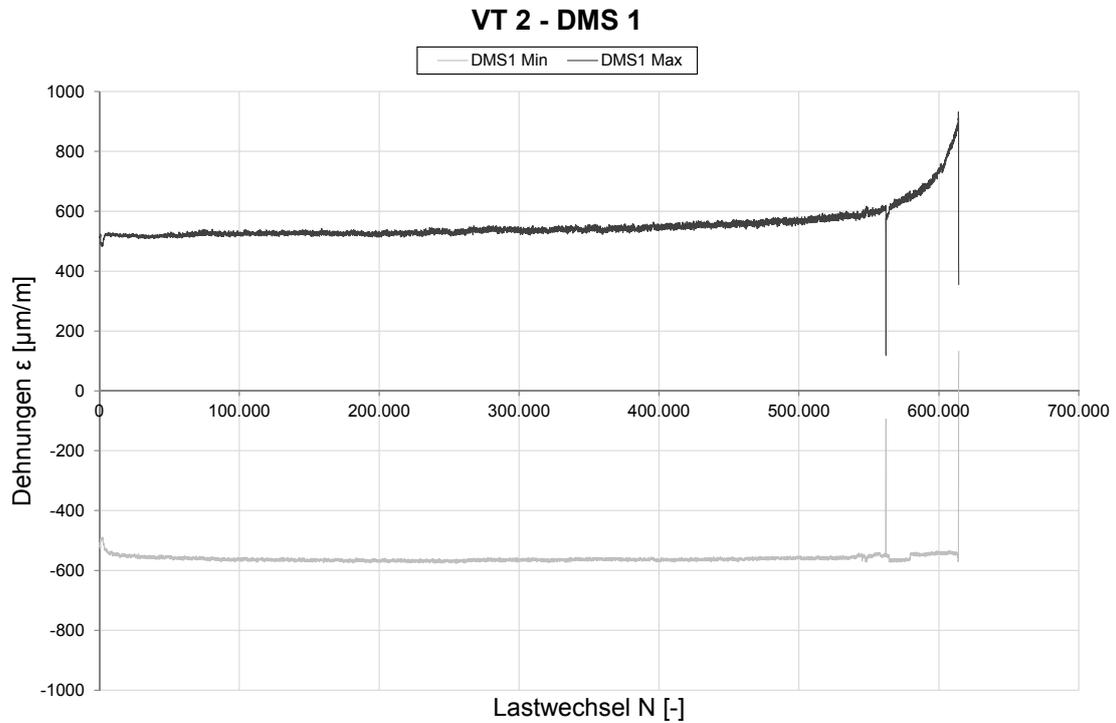


Foto Rissansicht isometrisch [3]

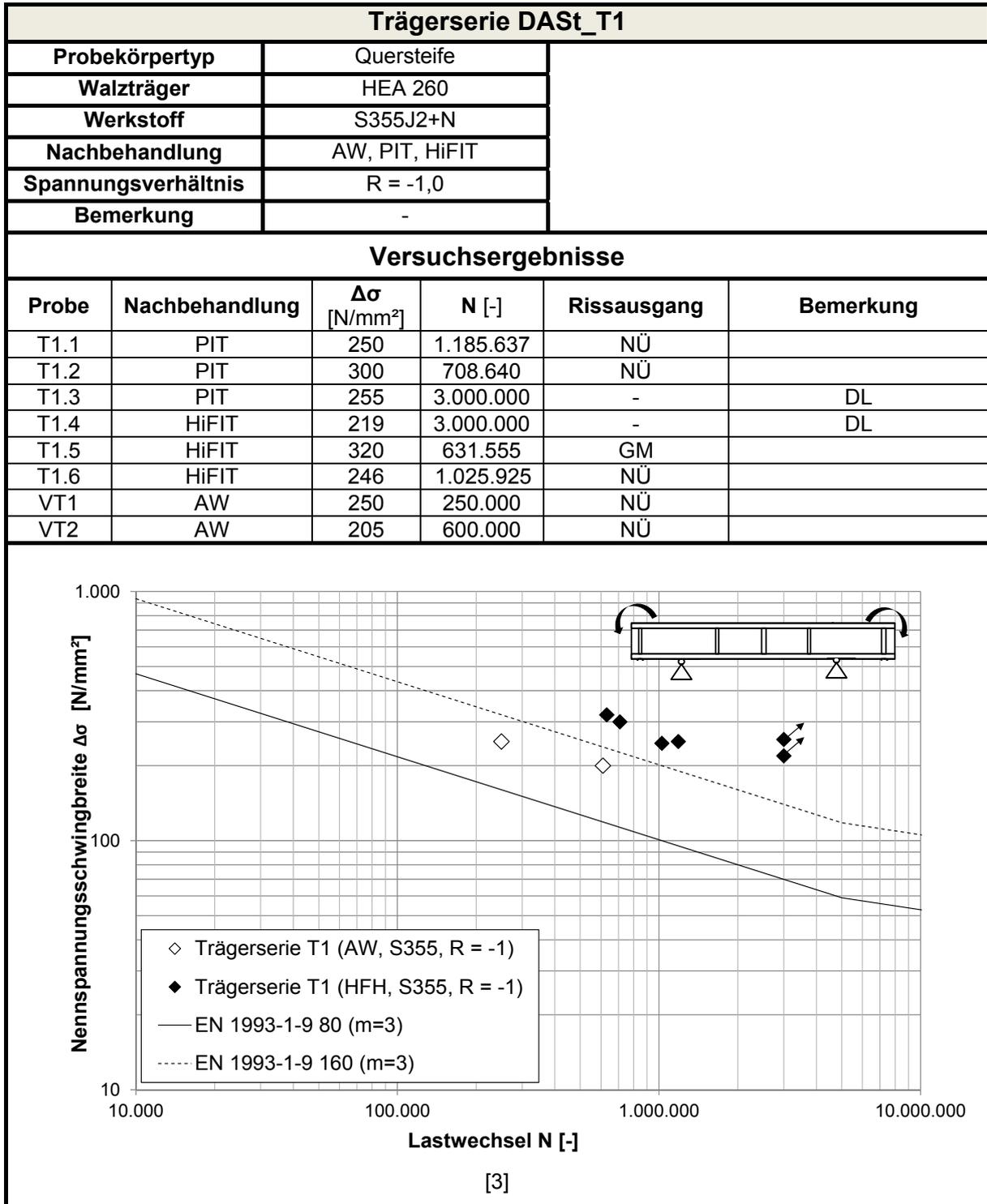
DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	VT 2	Zustand:	unbehandelt

4.) Dehnungsverlauf

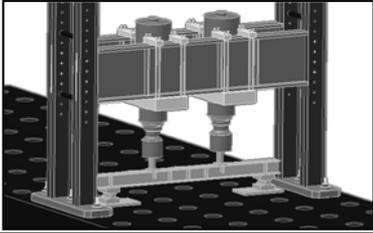


[3]

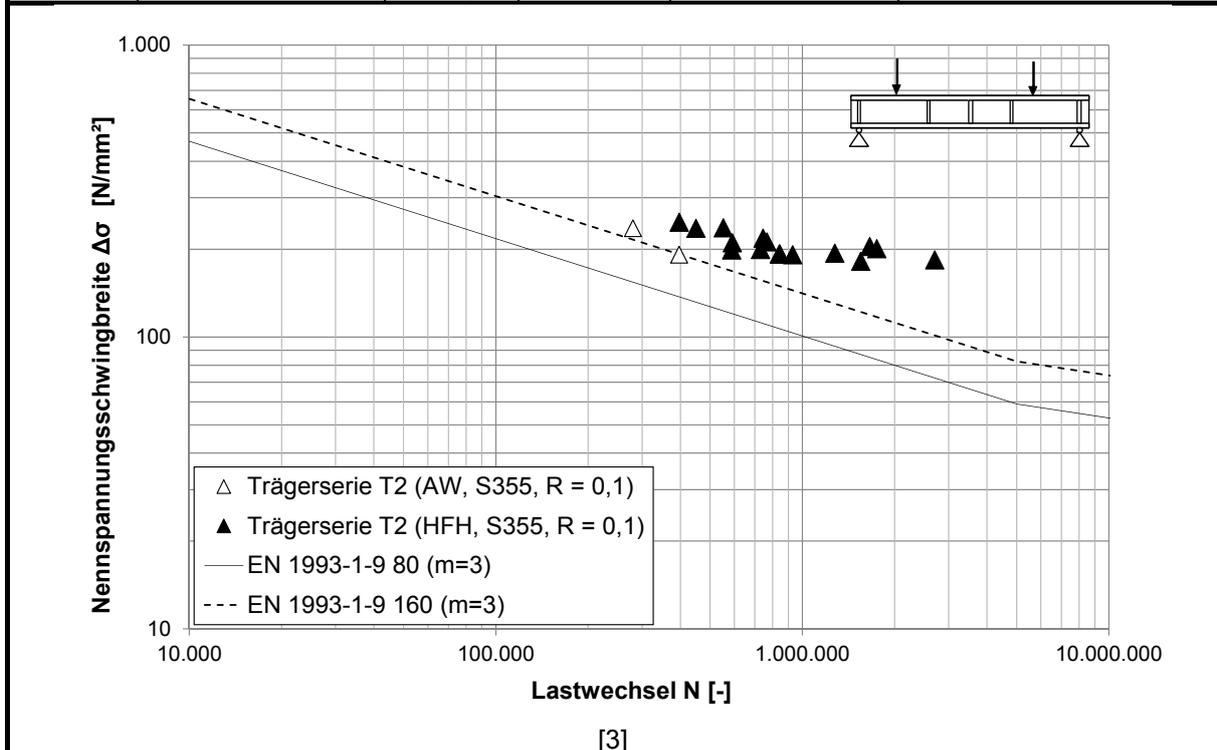
D.3. Ergebnisse der unter Wechsellast beanspruchten Trägerversuche T1



D.4. Ergebnisse der zugschwellbeanspruchten Trägerversuche T2

Trägerserie DAST_T2		
Probekörpertyp	Quersteife	
Walzträger	HEA 260	
Werkstoff	S355J2+N	
Nachbehandlung	AW, PIT, HiFIT	
Spannungsverhältnis	R = 0,1	
Bemerkung	-	

Versuchsergebnisse					
Probe	Nachbehandlung	$\Delta\sigma_{ist}$ [N/mm ²]	N [-]	Rissausgang	Bemerkung
T2.1	AW	191,4	396.203	NÜ	
T2.2	PIT	235,8	743.977	NÜ	
T2.3	PIT	218,0	929.671	NÜ	
T2.4	AW	191,3	280.000	NÜ	
T2.5	PIT	204,2	1.658.411	NÜ	
T2.6	PIT	183,8	2.704.453	GM (LE)	Lasteinleitungsstein
T2.7	PIT	193,6	1.276.150	NÜ	
T2.8	PIT	235,8	450.000	NÜ	
T2.9	PIT	211,5	765.789	NÜ	
T2.10	PIT	200,6	1.750.464	NÜ	Schweißspritzer
T2.11	HiFIT	236,8	551.930	NÜ	
T2.12	HiFIT	247,0	396.736	NÜ	
T2.13	HiFIT	210,1	590.571	NÜ	
T2.14	HiFIT	192,5	843.255	NÜ	
T2.15	HiFIT	192,5	840.900	NÜ	
T2.16	HiFIT	198,8	588.432	NÜ	
T2.17	HiFIT	181,6	1.550.100	NÜ	
T2.18	HiFIT	199,4	730.000	NÜ	



D.5. Bruchflächen ausgewählter Trägerversuche

DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T2.1	Zustand:	AW

Gesamtübersicht



Detail I



Detail II



DASSt-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DASSt-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T 2.5	Zustand:	PIT

Gesamtübersicht



Detail I



Detail II



DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T 2.8	Zustand:	PIT

Gesamtübersicht



Detail I



Detail II



Detail III



DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T 2.15	Zustand:	HiFIT

Gesamtübersicht



Detail I



Detail II



DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
Datenblatt Träger-Nr.:	T 2.18	Zustand:	HiFIT

Gesamtübersicht



Detail I



Detail II



DAST-AiF: IGF-Vorhaben 17886 Projekt: „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“		Universität Stuttgart Institut für Konstruktion & Entwurf Prof. Ulrike Kuhlmann	
--	--	---	--

Datenblatt Träger-Nr.:		Zustand:	
------------------------	--	----------	--

Gesamtübersicht



Detail I



Detail II



DAST-Richtlinien

Stand: Oktober 2018

Nr.	Titel	
001	Richtlinien für Verbindungen mit Schließringbolzen im Anwendungsbereich des Stahlhochbaus mit vorwiegend ruhender Belastung (2/70)	überholt durch Zulassungsregelung
002	Vorläufige Empfehlung zur Wahl der Stahlgütegruppen für geschweißte Stahlbauten (1/60)	ersetzt durch 009
003	Vorläufige Richtlinie für HV-Verbindungen (1963)	ersetzt durch 010
004	Vorläufige Empfehlungen für die Anwendung der elektrischen Widerstandspunktschweißung im Stahlbau (5/62)	überholt ersetzt durch Norm-Regelung
005	Ergänzung zu der vorläufigen Richtlinie für HV-Verbindungen für den Anwendungsbereich des Stahlhochbaus mit vorwiegend ruhender Belastung (3/67)	ersetzt durch 010
006	Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen im Stahlbau (12/08)	gültig
007	Lieferung, Verarbeitung und Anwendung wetterfester Baustähle (5/93)	gültig
008	Richtlinien zur Anwendung des Traglastverfahrens im Stahlbau (3/73)	überholt
009	Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten (6/76)	gültig
010	Anwendung hochfester Schrauben im Stahlbau (6/76)	überholt
011	Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindeststreckgrenzenwerten von 460 und 690 N/mm ² – Anwendung für Stahlbauten (2/88)	nur noch als Hintergrundliteratur
012	Beulsicherheitsnachweise für Platten zusammen mit Kommentar zur DAST-Richtlinie 012 – DIN Grundlagen-Erläuterungen-Beispiele (2/88)	überholt
013	Beulsicherheitsnachweise für Schalen (7/80)	überholt
014	Empfehlungen zum Vermeiden von Terrassenbrüchen in geschweißten Konstruktionen aus Baustahl (1/81)	gültig

Nr.	Titel	
015	Träger mit schlanken Stegen (7/90), DIN	nur noch als Hintergrundliteratur
016	Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen (2/92)	nur noch als Hintergrundliteratur
017	Beulsicherheitsnachweise für Schalen – spezielle Fälle (Entwurf 10/92)	überholt
018	Hammerschrauben (11/01)	gültig
019	Brandsicherheit von Stahl- und Verbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden (11/01)	gültig
020	Bemessung schlanker stählerner windbelasteter Kreiszyinderschalen (05/08)	gültig
021	Schraubenverbindungen aus feuerverzinkten Garnituren M 39 bis M 72 entsprechend DIN EN 14399-4, DIN EN 14399-6 (09/13)	gültig
022	Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen / Hot-dip-zinc-coating of load-bearing steel components (06/16)	gültig
023	Langlochverbindungen mit Schrauben	gültig
024	Anziehen von geschraubten Verbindungen der Abmessungen M12 – M36	gültig
103	Nationales Anwendungsdokument (NAD) für DIN V ENV 1993 Teil 1-1, (11/93)	überholt
104	Nationales Anwendungsdokument (NAD) für DIN V ENV 1994 Teil 1-1, (2/94)	überholt

Preise auf Anfrage

Forschungsberichte

Nr.	Titel
1/2004	Ankerplatten und Einbaudetails zur Kraftübertragung im Stahlbau
2/2004	15. DAST-Forschungskolloquium
1/2005	Entwicklung und Anwendung von Planungssoftware zur brandschutztechnischen Optimierung von Stahlgeschossbauten
2/2005	Entwicklung von Abreißverbindungen von Stahlkonstruktionen an Brandwänden
3/2005	Mittragende Betongurtbreite niedriger Verbundträger
4/2005	Bemessung stabilitätsgefährdeter, gevouteter Kragträger mit T-förmigen Querschnitt und Stegausschnitten aus ferritischem Stahl und gevouteten Kragträgern mit T-förmigem Querschnitt aus austenitischen nichtrostenden Stählen (Edelstahl Rostfrei)
5/2005	Korrelationsbedingter Flächeneffekt der Windersatzlasten und die Auswirkung auf die Tragwerksreaktionen
6/2005	Ermüdungsverhalten von Betondübeln
1/2006	16. DAST-Kolloquium
2/2006	Realitätsnahe Bestimmung der Tragfähigkeit beul- und biegedrillknick-Gefährdeter dünnwandiger Stahlquerschnitte
3/2006	Einsatz überlanger Schrauben zur Verbundsicherung bei Verbundträgern aus Normal- und Leichtbeton
4/2006	Werkstoffwahl im Stahlbrückenbau
1/2007	Abgrenzung des Anwendungsbereiches von Dächern nach DIN 18234
2/2007	Stahl-Glas-Verbindungen im Hinblick auf die Normung
3/2007	Einsatz von hochfesten Stählen und Betonen bei Hohlprofil-Verbundstützen
4/2007	Feststellung zulässiger Restspalte beim Schweißen
5/2007	Kranbahnträger – Wirtschaftliche Bemessung und Konstruktion robuster Radlasteinleitungen
1/2008	Entwicklung und Aufbereitung wirtschaftlicher Bemessungsregeln für Stahl- und Verbundträger mit schlanken Stegblechen im Hoch- und Brückenbau
2/2008	Duktilitätskriterien für Typisierte Stirnplattenverbindungen

Nr.	Titel
1/2009	Effiziente Nachweisführung von biegeknickgefährdeten, dünnwandigen Stahlquerschnitten
2/2009	Vereinfachte und einheitliche Stabilitätsnachweise für Bauteile aus Einscheiben- und Verbundscheibengläsern für Druck und Biegung
2/2009	Vereinfachte und einheitliche Stabilitätsnachweise für Bauteile aus Einscheiben- und Verbundscheibengläsern für Druck und Biegung
3/2009	Entwicklung eines Bemessungsmodells für geschraubte, momententragfähige Kopfplattenverbindungen mit 4 Schrauben in einer Schraubenreihe auf der Grundlage der prEN 1993-1-8:2003
1/2010	Tragende Scheiben-Elemente aus Stahl-Glas-Verbund
2/2010	Untersuchung des Einflusses konstruktiver Maßnahmen bezüglich der Sicherungseigenschaften gegen Lockern und Losdrehen von planmäßig vorgespannten HV-Schraubenverbindungen unter zyklischer Beanspruchung
4/2010	Gelenkige Sekundärträgeranschlüsse mit langen Fahnenblechen im Verbundbau
3/2010	Querkrafttragfähigkeit von Slim-Floor Trägern – Entwicklung eines neuen Bemessungsansatzes zur Berücksichtigung der Betontragfähigkeit
5/2010	Optimierte Windlastansätze auf der Basis einer realistischen und praxisorientierten Erfassung flächen- und längenkorrelierter Effekte infolge dynamischer Lastanteile
1/2011	Weiterentwicklung und Spezifizierung der Ermüdungsnachweise für Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Stahl
3/2011	Ergänzende Untersuchungen zur Bewertung zulässiger Restspalte zur Überführung in technische Regeln
4/2011	Standartlösungen für punktförmig gelagerte Verglasungen – Ermittlung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit
1/2013	Vereinfachtes Bemessungsverfahren geschraubter Stirnplattenanschlüsse nach DIN EN 1993-1-8
3/2013	Verbesserung der Tragfähigkeit von Ankerplatten mit angeschweißten Kopfbolzen in stabförmigen Stahlbetonbauteilen
1/2014	Ermüdungsfestigkeit von Montagestößen in Vollwandträgern mit dicken Gurten
2/2014	Verbesserung der Tragfähigkeit von Ankerplatten mit angeschweißten Kopfbolzen in stabförmigen Stahlbetonbauteilen
3/2014	Optimierter Einsatz intumeszierender Anstriche im Stahlbau

Nr.	Titel
4/2014	Ermittlung von Drehfedersteifigkeiten von Stahlbauanschlüssen zur Bestimmung des idealen Biegedrillknickmomentes
5/2014	Schweißen von kaltumgeformten Bauteilen – Kriterien für die Werkstoffauswahl
2/2015	Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile
3/2015	Dauerhaftigkeit und Dimensionierung des Randverbundes von Mehrscheibenisolierverglas in Abhängigkeit der Klimabelastung bei Zweifach- und Dreifachisolierverglas - DuraSeal
1/2016	Außergewöhnliche Bemessungssituationen nach DIN EN 1991-1-7 – Effektive Anwendung und Bemessungsstrategien für Stahl- und Verbundrahmentragwerke
1/2017	Große Ankerplatten mit Kopfbolzen für hochbeanspruchte Konstruktionen im Industrie- und Anlagenbau
2/2017	Untersuchungen zum Tragverhalten von hochfesten Schrauben unter kombinierter Zug- und Scherbeanspruchung
3/2017	Allgemeines Verfahren zum Nachweis gegen Stabilitätsversagen aus der Haupttragebene (ALLVER)
4/2017	Beulen mehrachsiger beanspruchter Platten
5/2017	Modell zur Erfassung der Rissbreiten bei durchlaufenden Stahlverbundträgern mit Teil- und Ganzfertigteilen
1/2018	Entwicklung einer DAST-Richtlinie für Höherfrequente Hämmerverfahren

Preise auf Anfrage

Herausgeber:
 Deutscher Ausschuss für Stahlbau DAST
 Vertrieb:
 Stahlbau Verlags- und Service GmbH,
 Postfach 10 51 45
 D-40042 Düsseldorf
 Tel.: 0211/67078-01
 Fax: 0211/67078-21

Forschungsberichte Stand: November 2018

Homepage: www.deutscherstahlbau.de
 Shop: <https://shop.deutscherstahlbau.de>
 E-Mail: contact@deutscherstahlbau.de

Berichte von 1973 - 2004

Titel	Berichtsheft / Autor	Erläuterungen
<p>Abschlußberichte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Versuche zur Kippsicherheit von durchlaufenden Pfetten mit leichter Dacheindeckung • Traglastversuch an durchlaufenden U-Pfetten mit Aluminium-Trapezblechen als Dacheindeckung • Traglastversuch an durchlaufenden Pfetten mit Leichtbetonplatten als Dacheindeckung • Das Stabilitätsproblem des in Höhe des oberen Flansches wirklichkeitsnah belasteten I-Trägers • Traglastversuche im überkritischen Bereich zur Entwicklung eines wirklichkeitsnäheren Berechnungsverfahrens für Leichtmetall-Vollwandträger • Versuche zur Feststellung des Einflusses verschiedener Zwischenanstriche auf den Berührungsfächen von Nietverbindungen aus St 52 • Regelan schlüsse im Stahlhochbau - Teil I: Traglastversuche an durch Querkraft beanspruchte Winkelanschlüsse mit rohen Schrauben • Einfluß der exzentrischen Lage von Wendeln auf die Tragfähigkeit von Kopfbolzendübeln • Dauerversuche mit einseitig geschweißter Stumpfnah in V-Form auf Keramik-Unterlage • Dauerfestigkeitsversuche mit stumpfgestossenen, in Normalgüte CO₂-geschweißten Stäben • Statische Versuche mit Verbindungen von Aluminium-Konstruktionen 	<p>1/1973</p> <p>Peilkan</p> <p>Oxford / Hildenbrand</p> <p>Oxford / Hildenbrand</p> <p>Fischer</p> <p>Steinhardt</p> <p>Hoffmann</p> <p>Oxford</p> <p>Roik / Lindner</p> <p>Hoffmann</p> <p>Hoffmann</p> <p>Seinhardt / Valtinat</p>	

<p>Abschlussberichte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dauerfestigkeitsversuche mit brenngeschnittenen Proben aus St 52-3 • Stabilitätsverhalten gedrückter Gurte von Blechträgern • Traglasten von auf Biegung und Torsion beanspruchten Stäben unter Berücksichtigung des plastischen Werkstoffverhaltens • Untersuchung der Tragfähigkeit von Stahlkonstruktionen mit ebenen, scheibenartig beanspruchten Blechen mittels wirklichkeitsnaher Großversuche (Plattenbeulprogramm) • Beiträge zum Beulproblem bei Kastenträgern <ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsbetrachtung beim Beulen von Kastenträgern • Kurzreferate und Inhaltsangaben zu den Vorträgen der Fachsitzung I, Deutscher Stahlbautag 1974 • Folgerungen aus den Schadensfällen im In- und Ausland • Der Merrison-Bericht und weiterführende Untersuchungen in Großbritannien • Neue Erkenntnisse und Theorien aus europäischen Forschungsarbeiten • Berechnungsmodelle für ausgesteifte Kastenträger • Aus der Arbeit des DAST-Unterausschusses „Stabilität“ und seiner Arbeitsgruppe „Plattenbeulen“ • Ermittlung des Reibungswertes μ zwischen Betonfertigteilen und Stahlunterlage • Zur Sprödbruchsicherheit von verzinkten und unverzinkten Stahlbauteilen mit gestanzten Löchern • Abwüργeversuche an feuerverzinkten und schwarzen HV-Schrauben • Verbindungen mit Schließringbolzen im Anwendungsbereich des Stahlhochbaues mit vorwiegend ruhender Belastung • Tragverhalten von Schließringbolzenverbindungen in schwingend beanspruchten Stahlkonstruktionen • Biegesteife HV-Kopfplattenverbindungen (Regelanschlüsse im Stahlhochbau Teil I) • Verbindungen hochfester Stähle mit hochfesten Schrauben • Dauerfestigkeit von querbeanspruchten Stumpfnähten mit kreuzenden Strichraupen • Zusammenwirken von Stumpfnähten mit HV-Schrauben und Nieten bei ruhender und bei Dauerbelastung 	<p>2/1975</p> <p>Hoffmann Barbré Roik / Lindner</p> <p>Barbré / Jungbluth / Roik / Scheer / Steinhardt</p> <p>Dubas</p> <p>Roik Godfrey</p> <p>Massonnet</p> <p>Steinhardt Scheer</p> <p>Roik</p> <p>Martin</p> <p>Steinhardt / Valtinat Steinhardt / Valtinat</p> <p>Steinhardt / Valtinat</p> <p>Steinhardt / Valtinat</p> <p>Hoffmann</p> <p>Aurnhammer / Hoffmann</p>
--	--

<p>Beiträge zum Beulproblem bei Kastenträgerbrücken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einführung • Folgerungen aus den Schadensfällen im In- und Ausland • Der Merrison-Bericht und weiterführende Untersuchungen in Großbritannien • Neue Erkenntnisse und Theorien aus europäischen Forschungsarbeiten • Berechnungsmodelle für ausgesteifte Kastenträger • Aus der Arbeit des DAST-Unterausschusses „Stabilität“ und seiner Arbeitsgruppe „Plattenbeulen“ 	<p>3/1975,</p> <p>Hoffmann Roik Godfrey</p> <p>Massonet</p> <p>Steinhardt Nölke</p>	<p>Vorträge aus der Fachsitzung I des Deutschen Stahlbautages Hamburg 1974 Leitung: Roik</p>
<p>Beiträge zum Tragverhalten und zur Sicherheit von Stahlkonstruktionen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorwort und Einführung • Zur Berechnung und Konstruktion druckbeanspruchter Schalen aus Stahl • Zum Stabilitätsverhalten von Trägern im Stahlhochbau • Zum Tragverhalten und Einsatz von Trapezprofilblechscheiben • Der wahrscheinlichkeitstheoretische Aspekt der Bauwerkssicherheit im Stahlbau • Grundgedanken zur Bemessung stählerner Eisenbahnbrücken auf Betriebsfestigkeit vor wahrscheinlichkeitstheoretischem Hintergrund <p>Rohrsandwichbrücken aus Stahl Ein neuer Brückentyp für mittlere Spannweiten</p>	<p>4/1977</p> <p>Jungbluth Bornscheuer</p> <p>Oxford Fischer Petersen</p> <p>Siebke</p>	<p>Vorträge aus der Fachsitzung II des Deutschen Stahlbautages Stuttgart 1976</p>
<p>Rohrsandwichbrücken aus Stahl Ein neuer Brückentyp für mittlere Spannweiten</p>	<p>5/1977</p> <p>Jungbluth, Bode</p>	<p>Berichte aus dem Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr- Universität Bochum, und dem Institut für Statik und Stahlbau, Technische Hochschule Darmstadt</p>

Berichte von 1915 - 1969

Titel	Jahr	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
Der Einfluß der Nietlöcher auf die Längenänderung von Zugstäben und die Spannungsverteilung in ihnen	Ausgabe A, Heft 1, 1915 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
Zur Einführung - Bisherige Versuche	Ausgabe B, Heft 1, 1915 Kögler	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
Versuche zur Prüfung und Abnahme der 3000 t-Maschine	Ausgabe A, Heft 2, 1920 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
	Ausgabe B, Heft 2	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche mit Anschlüssen steifer Stäbe	Ausgabe A, Heft 3, 1921 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
	Ausgabe B, Heft 3	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
	Ausgabe A, Heft 4	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche zur Ermittlung der Knickspannungen für verschiedene Baustähle	Ausgabe B, Heft 4, 1930 Rein	Berichte des Ausschusses für Versuche im Stahlbau
	Ausgabe A, Heft 5	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Dauerversuche mit Nietverbindungen	Ausgabe B, Heft 5, 1935 Graf	Berichte des Ausschusses für Versuche im Stahlbau
	Ausgabe A, Heft 6	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Untersuchungen über die Knickfestigkeit von gestoßenen Stützen mit plangefrästen Stoßflächen und nur teilweiser Stoßdeckung (Kontaktstöße) bei mittlerer und außermittiger Belastung	Ausgabe B, Heft 6, 1936 Bierett, Grüning	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 7	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Über das Verhalten geschweißter Träger bei Dauerbeanspruchung unter besonderer Berücksichtigung der Schweißspannungen	Ausgabe B, Heft 7, 1937 Bierett	Berichte des DAST

	Ausgabe A, Heft 8	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche über den Einfluß der Gestalt der Enden von aufgeschweißten Längsriegeln in Zuggliedern und von aufgeschweißten Gurtverstärkungen an Trägern	Ausgabe B, Heft 8, 1937 Graf	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 9	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Aus Untersuchungen mit Leichtfahrbahndecken zu Straßenbrücken	Ausgabe B, Heft 9, 1938 Graf	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 10	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Untersuchungen zur Ermittlung günstiger Herstellungsbedingungen für die Baustellengröße geschweißter Brückenträger	Ausgabe B, Heft 10, 1940 Bierett	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 11	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche und Feststellungen zur Entwicklung der geschweißten Brücken	Ausgabe B, Heft 11, 1940 Graf	Berichte des DAST
	Heft 12, 1941	Berichte des DAST
Versuche mit Nietverbindungen	Heft 13, Albers	Berichte des DAST
Einfluß der Nahtform und der Schweißausführung auf die Querverspannung beim Schweißen unter Einspannung		
Versuche über das Verhalten von geschweißten Trägern unter oftmals wiederholter Belastung	Heft 14, 1942 Graf	Berichte des DAST
Versuche mit geschweißten Trägern zur Beurteilung der Eignung der verwendeten Werkstoffe und der Art der Herstellung der Träger. Prüfung der Werkstoffe mit dem Nutzwinkelbiegeversuche und mit dem Kerbschlagbiegeversuch	Heft 15, 1943 Graf	Berichte des DAST
	Heft 16, 1951 Graf	Berichte des DAST
Versuche über die Widerstandsfähigkeit von geschweißten Querträgeranschlüssen bei oftmals wiederholter Biegebelastung	Heft 17, 1952 Graf / Munzinger	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	1. Teil, Heft 18, 1954 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
	Heft 19, 1956 Graf / Brenner	Berichte des DAST
Versuche an Verbundträgern	Heft 20, 1957 Kuntze	Berichte des DAST
Thermodynamik des Sprödbruches und ihre Anwendung im Stahlbau		

Thermodynamik des Sprödbrechens und ihre Anwendung im Stahlbau	2. Teil, Heft 20a, 1959 Kuntze	Berichte des DAST
Der Feuerschutz im Stahlhochbau insbesondere von Stahlstützen	Heft 21, 1959 Boué	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben	II. Teil, Heft 22, 1959 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
Untersuchungen zur Anwendung der elektrischen Widerstandspunktschweißung im allgemeinen Stahlbau	1. Teil, Heft 23, 1960, Bierett, Steinhardt	Berichte des DAST
HV-verschraubte Kopplattenverbindungen bei biegefesten Stabwerken	Vorabdruck aus Heft 24 1961 Steinhardt, Schlaginhaufen	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	III. Teil, Heft 24, 1962 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	IV. Teil, Heft 25, 1969 Steinhardt, Möhler, Valtinat	Berichte des DAST

