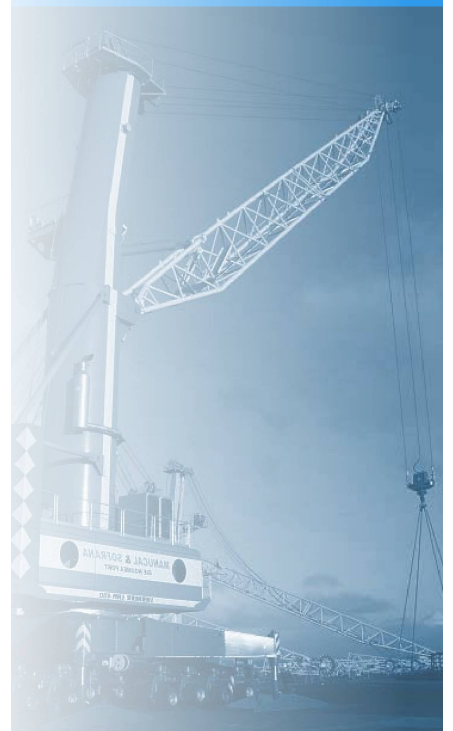
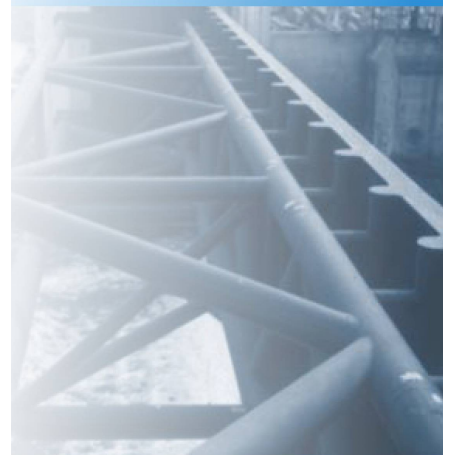


ZUTECH-Forschungsvorhaben
IGF-Nr. 325 ZBG

**Ermüdungsgerechte Fachwerke aus
Rundhohlprofilen mit dickwandigen
Gurten (FOSTA P815)**

Autorenkollektiv
Universität Stuttgart
Hochschule München
Universität der Bundeswehr
Schweißtechnische Lehr- und
Versuchsanstalt Halle

Stuttgart, 26.08.2013



Danksagung – Acknowledgement

Das Forschungsvorhaben (Nr. 325 ZBG) der Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA e. V.) wurde im Programm zur Förderung der „Zukunftstechnologien für kleine und mittlere Unternehmen (ZUTECH)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert. Die Autoren dieses Forschungsberichts möchten sich herzlich für die erfahrene finanzielle Unterstützung bedanken.

Weiterhin gilt Dank dem projektbegleitenden Ausschuss unter Betreuung von Herrn Dipl.-Ing. G. Nüsse (FOSTA) sowie allen Unternehmen der freien Wirtschaft, die das Forschungsvorhaben unterstützt haben:

- Vallourec & Mannesmann Deutschland GmbH, Düsseldorf, die das komplette Rundhohlprofilmaterial (ca. 50 Tonnen) für alle Versuche unentgeltlich gestellt hat,
- ZIS Industrietechnik GmbH, Meerane, für die kostenneutrale Bereitstellung von mehreren Brennschnittmustern als Entscheidungshilfe für den projektbegleitenden Ausschuss,
- PITEC GmbH, Heudorf, für die kostenlose Schweißnahtnachbehandlung der Prüfkörper,
- Maurer Söhne GmbH, München für die Durchführung der Reparaturen an den Prüfkörpern und dem Fachwerkträger und die Applikation von Messtechnik.

Darüber hinaus bedanken sich die Autoren bei den Mitarbeitern – insbesondere bei Herrn Dr.-Ing. G. Schellenberg, Herrn Dipl.-Ing. R. Haas und Herrn Dipl.-Ing. A. Keller – vom Fachbereich 2 „Baukonstruktionen und Werkstofftechnik“ (Abt. Werkstofftechnik) der MPA der Universität Stuttgart, an der die Schwingversuche mit Strebenbelastung durchgeführt wurden, bei Herrn Dr.-Ing. D. Lotze vom Fachbereich 2 „Baukonstruktionen und Werkstofftechnik“ (Abt. Baukonstruktionen und Bauteilprüfung) der MPA der Universität Stuttgart für die Stellung der Messtechnik und bei Herrn O. Schneider vom Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart für die Organisation und Applikation der Messeinrichtungen.

Besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern von Zwickauer Sonderstahlbau GmbH und von ZIS Industrietechnik GmbH für die zielführende Diskussion und Hinweise bei der Erarbeitung der Schweißkantenvorbereitung und Schweißanweisungen.

In diesem Schlussbericht sind Ergebnisse der Diplomarbeiten von Dipl.-Ing. S. Roth [103] und von Frau Dipl.-Ing. S. Spieth [114] eingeflossen ebenso wie von der Masterarbeit von Herrn M. Sc. M. Marczis [79].

Allgemeiner Hinweis zu diesem Forschungsbericht

Dieser Forschungsbericht besteht aufgrund des Umfangs der Forschungsergebnisse aus zwei Teilen. Im 1. Teil werden die erzielten Ergebnisse und Empfehlungen zusammenfassend dargestellt. Der 2. Teil enthält alle Messergebnisse und weiteren Informationen, auf die sich der 1. Teil des Forschungsberichts abstützt.

Zusammenfassung – Abstract

Geschweißte Rundhohlprofilkonstruktionen unter Ermüdungsbeanspruchung weisen eine weite Verbreitung im Bauwesen, Maschinen- und Anlagenbau auf. Geschweißte K-Knoten aus Rundhohlprofilen, bei denen der Gurt und zwei anschließende Streben die Form eines liegenden K bilden, treten besonders häufig auf und waren deshalb Gegenstand dieses Forschungsvorhabens. In jüngster Zeit werden vermehrt dickwandige Konstruktionen mit einer Gurtschlankheit $\gamma = r_0/t_0 < 12$ eingesetzt, für deren Realisierung es noch keine entsprechenden Regeln gibt.

Da die planenden Ingenieurbüros und fertigenden Unternehmen i. d. R. nicht die wirtschaftliche Position besitzen, eigens abgestellte Versuchsreihen mit kostenintensiven Schwingversuchen zu fahren, besteht die Notwendigkeit, für geschweißte dickwandige ermüdungsbeanspruchte Hohlprofilfachwerke einfach zu handhabende Konstruktions- und Bemessungshilfen zu schaffen. Daraus ergibt sich speziell für kleine und mittlere Unternehmen ein großes Potential an Kosten- und Materialeinsparung.

Das Forschungsvorhaben beschäftigte sich daher eingehend mit dem Ermüdungsverhalten von ebenen und räumlichen K-Knoten in dickwandigen Hohlprofilfachwerken in einer gesamtheitlichen Betrachtungsweise. Ziel war es, Empfehlungen für eine ermüdungsgerechte und zugleich wirtschaftliche Umsetzung von solchen Konstruktionen zu entwickeln.

Im Forschungsbericht wird der Stand der Wissenschaft und Technik mit Blick auf das Ermüdungsverhalten von dickwandigen Hohlprofilkonstruktionen zusammenfassend dargestellt, aus dem sich die zu klärenden offenen Fragestellungen und das Versuchsprogramm dieses Forschungsvorhabens ableiteten.

Unter dem Aspekt der Ermüdung wurden besondere Empfehlungen für die **Planung** und für die **Fertigung** von dickwandigen Hohlprofilkonstruktionen erarbeitet. Mit Blick auf die Bedürfnisse der Praxis wurde als Gurt-Strebenanschluss eine **Kombination aus Stumpf- und Kehlnaht** betrachtet. Diese Ausführung hat gegenüber dem reinen Stumpfnahanschluss zum einen schweißtechnische und zum anderen wirtschaftliche Vorteile.

Zur Bestimmung der **Ermüdungsfestigkeit** dickwandiger Hohlprofilkonstruktionen wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit Knotenschwingversuchen unter Strebenbelastung, unter Gurtbelastung und unter kombinierter Belastung von Gurt und Streben gefahren. Außerdem wurde ein großmaßstäblicher Trägerschwingversuch durchgeführt. Besonderes Augenmerk wurde in den Knotenschwingversuchen zum einen auf den Aspekt des **Größeneinflusses** auf das Ermüdungsverhalten gelegt. Zum anderen stand die Untersuchung zum Einfluss einer **Schweißnahtnachbehandlung** durch inzwischen industriell verfügbare höherfrequente Hämmerverfahren auf die Ermüdungsfestigkeit im Mittelpunkt. Diese Untersuchungen wurden durch mehrere Kleinversuchsserien ergänzt, die wichtige Hinweise für die Bewertung von nachbehandelten Hohlprofilkonstruktionen und zur Bewertung von Reparaturschweißungen lieferten.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Zusammenfassung – Abstract

Welded structures made of circular hollow sections under fatigue loading are widely used in civil, mechanical and plant engineering. Welded tubular K-joints, whereby the chord together with two braces forms a lying K, are particularly frequent and therefore the subject of the research project. Recently more and more thick-walled structures with a chord slenderness $\gamma = r_0/t_0 < 12$ are required, but no appropriate rules are available for their realization.

As consulting engineers and manufacturing companies normally do not have the economic background for financing individual test series with cost-intensive fatigue tests, there is the need for practical guidance covering the construction and the design of welded thick-walled tubular trusses with fatigue loading. Hence there is a great potential of saving money and material in particular for small and medium-sized companies.

Therefore the research project was extensively dealing with the fatigue behavior of uni- and multiplanar K-joints in thick-walled tubular trusses in a holistic view. The goal of the research project was to develop recommendations for a fatigue-appropriate and at the same time economic realization of such structures.

In the research report the State of the Art is summarized especially focusing on the fatigue behavior of thick-walled tubular structures from which unanswered questions and the work packages of the research project were derived.

In terms of fatigue particular recommendations for the **planning** and **fabricating** of constructions made of welded circular hollow sections were acquired. Addressing the needs of practitioners a **combination of butt and fillet weld** for the brace-to-chord intersection was considered. This kind of joint has on the one hand technological and on the other hand economic advantages over a butt-weld joint.

For the determination of the **fatigue strength** of thick-walled tubular structures an extensive test program was carried through comprising component fatigue tests under brace loading, chord loading and combined loading. Furthermore a large-scale girder test was performed. On the one hand particular focus was laid on the **size effect** in the component fatigue tests. On the other hand the investigations of the influence of **post-weld treatment** on the fatigue resistance using the meanwhile commercially available high-frequency hammering technology formed the main part of the work. These investigations were complemented by several small-scale test series which revealed important information concerning the evaluation of post-weld treated tubular structures and the evaluation of repair weldings.

The goal of the research project has been achieved.

Inhaltsverzeichnis – Content

Danksagung	I
Zusammenfassung	III
Zusammenfassung (englisch)	V
Formelzeichen – Symbols	XV
1 Einleitung – Introduction	1
1.1 Forschungsgegenstand – Object of research	1
1.2 Neue Entwicklungen – New developments	3
1.3 Gliederung des Berichts – Structure of the report	5
2 Stand der Forschung – State of the Art	7
2.1 Bemessungskonzept für Ermüdung – Evaluation concept for fatigue	7
2.2 Strukturbeanspruchung – Structural stress	10
2.2.1 Überblick – Overview	10
2.2.2 Ermittlung der Strukturspannung – Determination of structural stress . . .	10
2.2.3 Extrapolationsabstände – Extrapolation limits	13
2.2.4 Spannungsart – Kind of stressing	17
2.2.5 Tabellierte SCF-Werte – Tabled SCF values	18
2.3 Ermüdungsfestigkeit – Fatigue strength	20
2.4 Größeneinfluss – Size effect	22
2.4.1 Einführung – Introduction	22
2.4.2 Gurtschlankheit – Chord slenderness	24
2.4.3 Absolute Wanddicke – Absolute wall thickness	24
2.5 Art der Belastung – Type of loading	26
2.6 Schweißnahtausbildung – Weld profile	29
2.7 Schweißnahtnachbehandlung – Post weld treatment	32
2.8 Reparaturschweißungen – Weld repair	34
2.9 Zusammenfassung – Summary	35
3 Forschungsziele und -programm – Research goals and work packages	37
3.1 Forschungsziele – Research goals	37
3.2 Versuchsprogramm – Test program	39
3.3 Beschreibung der Prüfkörper – Description of test specimens	43
3.3.1 Einleitung – Introduction	43

3.3.2	Profilabmessungen – Dimensions of hollow sections	43
3.3.3	Stahlsorte – Steel grade	46
3.3.4	Materialeigenschaften – Material properties	46
3.3.5	Fertigung – Fabrication	48
4	Planung von K-Knoten – Planning of tubular K-joints	51
4.1	Allgemein – General	51
4.2	Knotenform – Joint type	51
4.3	Typischer Anwendungsbereich – Typical scope	52
4.4	Aspekte der Ermüdung – Aspects of fatigue	52
4.4.1	Schweißnahtnachbehandlung – Post-weld treatment	52
4.4.2	Spaltmaß – Gap size	57
4.5	Konstruktion der Prüfkörper – Detailing of test specimens	61
4.6	Zusammenfassung – Summary	62
5	Fertigung von Hohlprofilknoten mit K-Form – Fabrication of tubular K-joints	63
5.1	Einführung – Introduction	63
5.2	Überblick – Overview	63
5.3	Besondere Hinweise zur Fertigung – Particular guidance on fabrication	65
5.3.1	Schweißnahtform – Weld shape	65
5.3.2	Schweißnahtgröße – Effective weld size	66
5.3.3	Übergangsbereich – Transition region	67
5.3.4	Heftnähte, Schweißreihenfolge – Tack welds, welding sequence	69
5.3.5	Schweißbadsicherung – Weld backing	70
5.3.6	Schweißposition – Welding position	71
5.3.6.1	Übliche Ausführungen – Frequent executions	71
5.3.6.2	Schweißpositionen der Prüfkörper – Welding position for tests	71
5.3.7	Schweißverfahren – Welding process	74
5.4	Schweißanweisungen – Welding procedure specifications	77
5.5	Überprüfung der Fertigungsempfehlungen – Check of fabrication recommendations	80
5.5.1	Vorbemerkung – Preliminary remark	80
5.5.2	Arbeitsprobe – Work sample	80
5.5.3	Fertigung der Hohlprofilknoten – Fabrication of tubular joints	81
5.5.4	Fertigung des Fachwerkträgers – Fabrication of tubular truss girder	84
5.5.5	Schweißkantenvorbereitung – Weld preparation	86
5.5.6	Schweißanweisung – Welding procedure specification	87
5.5.7	Schweißnahtnachbehandlung – Post-weld treatment	94
5.5.8	Zusammenfassung – Summary	97
6	Versuche mit Strebennormalkraft – Tests with brace normal force	99
6.1	Einführung – Introduction	99
6.2	Versuchskonzept – Test concept	99
6.3	Versuchsdurchführung – Test realisation	101
6.3.1	Versuchseinrichtung – Test setup	101
6.3.2	Versuchskörper – Test specimens	105
6.3.3	Prüfbedingungen – Test conditions	105
6.3.4	Statische Vorversuche – Static pretests	108

6.3.5	Ermüdungsversuche – Fatigue tests	108
6.4	Versuchsbegleitende Untersuchungen – Accompanying tests	109
6.4.1	Dehnungsmessungen – Strain measurements	109
6.4.2	Druckprüfung – Pressure measurements	110
6.4.3	Sichtprüfung – Visual inspections	110
6.5	Versuchsergebnisse – Test results	111
6.5.1	Statische Vorversuche – Static pretests	111
6.5.2	Bestimmung von SNCF-Werten – Determination of SNCF values	115
6.5.3	Ermüdungsversuche – Fatigue tests	122
6.5.3.1	Ertragene Schwingspiele – Number of cycles to failure	122
6.5.3.2	Rissinitiierung und -fortschritt – Crack initiation and propagation	122
6.5.4	Vergleich mit dünnwandigen K-Knoten – Comparison with thin-walled K-joints	131
6.6	Versuchsauswertung – Evaluation of test results	133
7	Versuche mit Strebenbiegung – Tests with brace bending	135
7.1	Einführung – Introduction	135
7.2	Versuchskonzept – Test concept	135
7.3	Versuchsdurchführung – Test realisation	136
7.3.1	Versuchseinrichtung – Test setup	136
7.3.2	Prüfbedingungen – Test conditions	137
7.3.3	Prüfkörper – Test specimens	138
7.3.4	Statische Vorversuche – Static pretests	139
7.3.5	Ermüdungsversuche – Fatigue tests	139
7.4	Versuchsbegleitende Untersuchungen – Accompanying tests	139
7.4.1	Dehnungsmessungen – Strain measurements	139
7.4.2	Druckprüfung – Pressure measurements	139
7.4.3	Sichtprüfung – Visual inspection	140
7.5	Versuchsergebnisse – Test results	141
7.5.1	Statische Vorversuche – Static pretests	141
7.5.2	Ermüdungsversuche – Fatigue tests	143
7.5.2.1	Ertragene Schwingspiele – Number of cycles to failure	143
7.5.2.2	Rissinitiierung und -fortschritt – Crack initiation and propagation	143
7.6	Versuchsauswertung – Evaluation of test results	148
8	Versuche mit Gurtbelastung, Teil I – Tests with chord loading, Part I	149
8.1	Versuchskonzept – Test concept	149
8.2	Versuchsdurchführung – Test realisation	151
8.2.1	Versuchseinrichtung – Test setup	151
8.2.2	Prüfkörper – Test specimens	156
8.2.3	Statische Vorversuche – Static pretests	156
8.2.4	Ermüdungsversuche – Fatigue tests	156
8.3	Begleituntersuchungen – Accompanying tests	157
8.3.1	Dehnungsmessungen – Strain measurements	157
8.3.2	Rissprüfung – Crack inspection	158
8.4	Versuchsergebnisse – Test results	159
8.4.1	Bestimmung von SNCF-Werten – Determination of SNCF values	159

8.4.2	Ermüdungsversuche – Fatigue tests	161
8.4.2.1	Ertragene Schwingspiele – Number of cycles to failure	161
8.4.2.2	Rissinitiierung und -fortschritt – Crack initiation and propagation	164
8.4.2.3	Vergleich der Testserien – Comparison of test series	170
9	Versuche mit Gurtbelastung, Teil II – Tests with chord loading, Part II	177
9.1	Versuchskonzept – Test concept	177
9.2	Versuchseinrichtung – Test setup	178
9.3	Prüfkörper – Test specimens	180
9.4	Begleituntersuchungen – Accompanying tests	180
9.5	Versuchsergebnisse – Test results	182
9.5.1	Dehnungsmessungen – Strain measurements	182
9.5.2	Ertragene Schwingspiele – Number of cycles to failure	183
9.5.3	Vergleich der Testserien – Comparison of test series	185
9.5.4	Rissinitiierung und -fortschritt – Crack initiation and propagation	190
10	Versuche mit kombinierter Belastung – Tests with combined loading	195
10.1	Einführung – Introduction	195
10.2	Versuchskonzept – Test concept	195
10.3	Versuchsdurchführung – Test realisation	196
10.3.1	Versuchseinrichtung – Test setup	196
10.3.2	Prüfkörper – Test specimens	196
10.3.3	Prüfbedingungen – Test conditions	198
10.3.4	Statische Vorversuche – Static pretests	198
10.3.5	Ermüdungsversuche – Fatigue tests	198
10.4	Versuchsbegleitende Untersuchungen – Accompanying tests	198
10.5	Versuchsergebnisse – Test results	199
10.5.1	Statische Vorversuche – Static pretests	199
10.5.2	Bestimmung von SNCF-Werten – Determination of SNCF values	201
10.5.3	Ermüdungsversuche – Fatigue tests	211
10.5.3.1	Ertragene Schwingspiele – Number of cycles to failure	211
10.5.3.2	Rissinitiierung und -fortschritt – Crack initiation and propagation	211
10.6	Versuchsauswertung – Evaluation of test results	216
11	Trägerversuch – Girder test	217
11.1	Versuchskonzept – Test concept	217
11.2	Versuchsdurchführung – Test realisation	217
11.2.1	Prüfträger – Test girder	217
11.3	Versuchseinrichtung – Test setup	218
11.4	Versuche – Tests	221
11.4.1	Erster Ermüdungsversuch – First fatigue test	221
11.4.2	Reparatur – Repair	221
11.4.3	Nachbehandlung – Post weld treatment	221
11.4.4	Zweiter Ermüdungsversuch – Second fatigue test	222
11.5	Begleituntersuchungen – Accompanying tests	222
11.5.1	Vorbemerkung – Preliminary remark	222
11.5.2	Dehnungsmessungen – Strain measurements	222

11.5.3	Verformungsmessungen – Deformation measurements	224
11.6	Versuchsergebnisse – Test results	227
11.6.1	Erster Ermüdungsversuch: Dehnungsmessung – First fatigue test: strain measurements	227
11.6.2	Erster Ermüdungsversuch: Verformungsmessung – First fatigue test: de- formation measurements	228
11.6.3	Erster Ermüdungsversuch: Versagensmodus – First fatigue test: failure mode	229
11.6.4	Zweiter Ermüdungsversuch: Dehnungsmessung – Second fatigue test: strain measurements	231
11.6.5	Zweiter Ermüdungsversuch: Verformungsmessung – Second fatigue test: deformation measurements	232
11.6.6	Zweiter Ermüdungsversuch: Versagensmodus – Second fatigue test: fai- lure mode	232
12	Kleinversuche – Small-scale testing	239
12.1	Problemstellung – Statement of the problem	239
12.2	Analyse der Beanspruchung – Analysis of loading	240
12.3	Fertigung der Prüfkörper – Fabrication of tests	242
12.3.1	Vorbemerkung – Primary note	242
12.3.2	Versuchsreihen – Test series	244
12.4	Versuchsdurchführung – Test execution	244
12.5	Versuchsergebnisse – Test results	245
12.6	Versuchsauswertung – Evaluation of test results	247
12.6.1	Nennspannungskonzept – Classification method	247
12.6.1.1	Auswertung durch SLV Halle – Evaluation by SLV Halle	247
12.6.1.2	Auswertung nach Eurocode 3 – Evaluation acc. to Eurocode 3	248
12.6.1.3	Zusammenfassung – Summary	250
12.6.2	Strukturspannungskonzept – Structural stress concept	251
12.6.2.1	Überblick – Overview	251
12.6.2.2	Ergebnisse – Results	251
12.6.3	SNCF-Werte der Schweißnahtwurzel – SNCF-values of weld root	254
12.7	Erweitertes Strukturspannungskonzept – Extended structural stress concept	255
12.8	Vergleich mit Regelwerken – Comparison to regulations	256
12.8.1	Empfehlungen von API – Recommendations by API	256
12.8.2	Empfehlungen von DNV – Recommendations by DNV	257
12.8.3	Empfehlungen von IIW – Recommendations by IIW	257
12.9	Zusammenfassung – Summary	257
13	Reparatur von Hohlprofilknoten – Repair of tubular joints	259
13.1	Einführung – Introduction	259
13.2	Versuchskonzept – Test concept	259
13.3	Reparatur der Prüfkörper – Repair of test specimens	260
13.3.1	Kleinprüfkörper – Small scale specimens	260
13.3.2	K-Knoten – K-joints	262
13.4	Versuchsdurchführung – Test concept	266
13.5	Versuchsergebnisse – Test results	266
13.5.1	Kleinprüfkörper – Small scale specimens	266

13.5.2 K-Knoten – K-joints	269
13.6 Zusammenfassung – Summary	270
14 Numerische Untersuchungen – Numerical investigations	273
14.1 Einleitung – Introduction	273
14.2 Beschreibung des FE-Modells – Description of FE model	274
14.2.1 Statisches System – Structural system	274
14.2.2 Schweißnahtdetails – Weld details	274
14.2.3 Diskretisierung – Discretisation	276
14.2.4 Verschneidungen – Intersections	278
14.2.5 Übergangsbereich – Transition region	280
14.2.6 Belastung – Loading	280
14.2.7 Ermittlung der Strukturspannungen – Determination of structural stresses	281
14.3 Sensitivitätsanalyse – Sensitivity analysis	284
14.4 Validierung – Validation	285
14.5 Strukturspannungs-Schwingbreiten in den Versuchen – Structural stress ranges of fatigue tests	294
14.6 Statistische Auswertung	301
14.6.1 Allgemeine Vorgehensweise – General approach	301
14.6.2 Modifikation für den Mittelspannungseinfluss – Modifikation for mean stress influence	303
14.6.3 Modifikation für Größeneinfluss – Modification for size effect	307
14.6.4 Modifikation für Abbruchkriterium – Modifikation on failure criterion	307
14.6.5 Modifizierte statistische Datenbasis – Modified statistical data base	307
14.6.6 Lineare Regression – Linear regression	311
14.6.7 Einseitiges 95%-Vorhersageintervall – One-sided 95% prediction bound .	312
14.6.8 Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit – Reference value of fatigue strength	312
14.6.9 Einseitiges 95%-Toleranzgrenze (75% Vertrauen) – One-sided 95% tole- rance lower bound (75% confidence)	315
14.6.10 Einordnung der Ergebnisse – Evaluation of results	318
14.6.11 Zusammenfassung – Summary	327
14.7 Parameterstudie – Parametric study	328
15 Hinweise zur Stahlsortenwahl – Guidance on selection of materials	379
15.1 Anlass – Reason	379
15.2 Ursachenforschung – Analysis	380
15.3 Weiterführende Untersuchungen – Further investigations	381
15.4 Schlussfolgerung – Conclusion	384
16 Schlussfolgerungen – Conclusions	385
16.1 Empfehlungen – Recommendations	385
16.1.1 Planung von K-Knoten – Design of K-joints	385
16.1.2 Fertigung von K-Knoten – Fabrication of K-joints	385
16.1.3 Ermüdungsfestigkeit von K-Knoten – Fatigue strength of K-joints	386
16.1.4 Ermüdungsbeanspruchung von K-Knoten – Fatigue stressing of K-joints .	387
16.1.5 Ermüdungsbemessung von nachbehandelten K-Knoten – Fatigue design of post-weld treated K-joints	387

16.1.6 Ermüdungsbemessung von reparierten K-Knoten – Fatigue design of repaired K-joints	388
16.2 Ausblick	388
16.3 Offene Fragen	389
A Anhang – Appendix	391
A.1 Werkpläne – Working drawings	391
A.2 Schweißanweisungen – Weld procedure specifications	399
Literaturverzeichnis – Reference	433

Formelzeichen – Symbols

Lateinische Formelzeichen – Latin symbols

A_0	Querschnittsfläche des Gurtprofils
A_1	Querschnittsfläche des Strebenprofils
a	Kehlnahtdicke
d_0	Durchmesser des Gurtprofils, in anderer Literatur auch D
d_1	Durchmesser der Strebe, in anderer Literatur auch d
e	Ausmitte
F_0	Gurtnormalkraft
F_1	Strebennormalkraft
g	Spaltmaß
L	Abstand vom Schweißnahtübergang für eine Extrapolation
M_0	Gurtbiegemoment
M_1	Strebenbiegemoment
m	Gleichgewichtsfaktor oder Neigung der Wöhlerlinie
$N1$	Zahl der Spannungsspiele bis 15 % Dehnungsabfall
$N2$	Zahl der Spannungsspiele bis zur Sichtbarkeit des Risses
$N3$	Zahl der Spannungsspiele bis zur 1. Rissdurchdringung der Wanddicke
$N4$	Zahl der Spannungsspiele bis zum Bruch (Tragfähigkeitsverlust)
r_0	Gurtradius
r_1	Strebenradius
P_s	Versagenswahrscheinlichkeit
R	Spannungsverhältnis
t_0	Wanddicke des Gurtprofils, in anderer Literatur auch T
t_1	Wanddicke der Strebe, in anderer Literatur auch t
t_{ref}	Referenzwanddicke
V	Querkraft
W_0	Widerstandsmoment des Gurtprofils
W_1	Widerstandsmoment des Strebenprofils
w	Schenkelmaß der Schweißnaht = Schweißnahtspur
x, y, z	Koordinaten im kartesischen Koordinatensystem

Griechische Formelzeichen – Greek symbols

α	Fasenwinkel der Schweißnahtvorbereitung
β	Durchmesser Verhältnis
γ	Gurtschlankheit
γ_{Mf}	Teilsicherheitsbeiwert der Widerstandsseite
γ_{Ff}	Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkungsseite
δ	Umlaufwinkel
ε	Nahtöffnungswinkel
θ	Strebenneigung im Querschnitt

σ_{HS}	einwirkende Strukturspannung, auch <i>Hot-Spot</i> -Spannung genannt
$\Delta\sigma_{c,HS}$	Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit auf Strukturspannungsniveau bei $N = 2$ Mio. Schwingspielen
σ_{nom}	einwirkende Nennspannung
$\Delta\sigma_{c,nom}$	Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit auf Nennspannungsniveau bei $N = 2$ Mio. Schwingspielen
τ	Wanddickenverhältnis
ϕ	Strebenneigung in Gurtlängsrichtung

Indizes – Indices

<i>ax</i>	Normalkraft (engl. <i>axial force</i>)
<i>br</i>	Strebe (engl. <i>brace</i>)
<i>ch</i>	Gurt (engl. <i>chord</i>)
<i>ipb</i>	Biegung in der Ebene (engl. <i>in-plane bending</i>)
<i>L</i>	in Längsrichtung
<i>nom</i>	Nenn-, nominell
<i>opb</i>	Biegung aus der Ebene (engl. <i>out-of-plane bending</i>)
<i>Q</i>	in Querrichtung
<i>ref</i>	infolge Belastung der Bezugsstrebe

Abkürzungen – Abbreviations

ABS	American Bureau of Shipping
API	American Petroleum Institute
AWS	American Welding Society
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
CIDECT ..	internationale Vereinigung der Hohlprofilhersteller (Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire)
DNV	Det Norske Veritas, norwegische Klassifikationsgesellschaft (Schiffsbau, Energiewirtschaft etc.)
DMS	Dehnungsmessstreifen
ECSC	European Coal and Steel Community
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
EWG III ...	ECSC-Working Group III „Tubular joints“
FE	Finite Elemente
GL	Germanischer Lloyd, deutsche Klassifikationsgesellschaft (Schiffsbau, Energiewirtschaft etc.)
IIW	International Institute of Welding
PBA	projektbegleitender Ausschuss zu diesem Forschungsvorhaben
SCF	Spannungskonzentrationsfaktor (engl. <i>stress concentration factor</i>)
SNCF	Dehnungskonzentrationsfaktor (engl. <i>strain concentration factor</i>)
WPS	Schweißanweisung (engl. <i>welding procedure specification</i>)