

Schriftenreihe Stahlbau - RWTH Aachen

Heft 56

Jörg Stötzel

**Ermittlung von Materialermüdungsfestigkeitskurven
im Kurz-, Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich
von einseitigen Schweißverbindungen
zweier Aluminiumlegierungen**

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4408-5

ISSN 0722-1037

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Die Leistungsfähigkeit von Brückengeräten aus Aluminium drückt sich in der maximalen Belastbarkeit und Spannweite, der Lebensdauer (~ 3.000 Verlegungen und ca. 10.000 bis 30.000 Überfahrten) und in dem Transport- und Verlegeaufwand (Anzahl der Fahrzeuge und erforderliches Personal) aus.

Die Wahl des Konzeptes wird erheblich durch den Ermüdungsnachweis bestimmt, der bedingt durch die Anforderungen im Übergang zwischen Kurzzeitermüdung und Langzeitermüdung stattfindet.

Leider existierten bis heute keine genauen Ermüdungsfestigkeitsdaten für die im Brückengerätebau verwendeten Konstruktionen aus hochfesten schweißbaren Legierungen AlZn4,5Mg 1; die EN 1999 - Eurocode 9 – Konstruktion und Berechnung von Aluminiumkonstruktionen – reicht nicht aus.

Hier setzt die Zielsetzung der Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Jörg Stötzel an, nämlich durch neue Ermüdungsversuche mit für den Brückengerätebau wichtigen Schweißdetails und Nachbehandlungen die Grundlage für eine neue Auswertung zu schaffen und diese so durchzuführen, dass mit dem Wöhlerlinienkonzept mit verschiedenen Ermüdungsfestigkeiten für diese Details, mit dem Kerbspannungsverfahren und mit bruchmechanischen Verfahren flexible Methoden zur Anwendung für allgemeine Bemessungssituationen und für Brückengeräte zur Verfügung stehen.

Die Herstellung der Prüfkörper bei der Firma Alcan Singen und die Durchführung der Ermüdungsversuche an der FH Konstanz sowie die ersten Auswertungen an der RWTH-Aachen wurden im Rahmen der Studie „Schadenstolerante Konstruktion Pionier-Gerät, Teil II“ des Bundesamtes für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB) in Koblenz finanziell gefördert. Die weiterführenden Arbeiten zur Verbesserung der Ermüdungseinstufungen und Erweiterung der Nachweismethoden erfolgte in einem weiteren Auftrag der Firmen MAN Technologie, Mainz, Alcan Singen und Dornier Eurobridge in Friedrichshafen.

Den Förderern sei herzlich gedankt, ebenso Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. T. Seeger von der TU Darmstadt und Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann von der RWTH Aachen. Beide haben die Arbeit durch ihre wertvollen Anregungen und die Übernahme der Berichtertätigkeit im Rahmen des Promotionsverfahren sehr gefördert.

Dank gilt auch dem Shaker-Verlag für die Übernahme des Drucks und dem Forschungsförderverein Baustatik, Massivbau, Stahlbau e.V. (FFBMS) für die Übernahme der anteiligen Druckkosten.

Aachen, August 2005

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Sedlacek

KURZFASSUNG

Im Eurocode 9 "Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten" Teil 1-3 "Ermüdungsanfällige Tragwerke" ist der Ermüdungsnachweis nach dem Nennspannungskonzept für einige im Aluminiumbau häufig vorkommende Bauteile geregelt. Der Eurocode 9 Teil 1-3 regelt das Nennspannungskonzept für Lastwechselzahlen größer als 10^5 , nur für einige Kerbdetails gibt es Erweiterungen in den Bereich zwischen 10^3 und 10^5 Lastwechsel. Einseitig stumpfgeschweißte Verbindungen mit temporärer Badsicherung, ein Kerbdetail, welches im Brückengerätebau häufiger anzutreffen ist, werden jedoch nicht ausreichend abgedeckt. So kann man zum Beispiel für die verschiedenen, möglichen Nahtnachbehandlungen (Nähte belassen, Nähte wurzelseitig abgearbeitet und Nähte beidseitig abgearbeitet) im Eurocode 9 Teil 1-3 keine Kerbfalleinstufungen finden.

Zur Erweiterung der normativ geregelten Kerbfalltabellen um diese drei Kerbfälle, wurde für die Legierungen AlZn4,5Mg1 und AlMgSi0,5 ein Versuchsprogramm durchgeführt, mit dem auch Einflüsse aus Festigkeit (F22, F35 und F41), Auslagerungsart nach dem Schweißen (Warm- und Kaltauslagerung), Blechdicke (t) und Spannungsverhältnis (R) abgedeckt wurden. Durch die lineare Regression der Versuchsergebnisse wurden die Nennspannungswöhlerlinien ermittelt.

Anschließend sind die Versuchsergebnisse für gekerbte Proben mit Hilfe des Kerbspannungskonzeptes auf die Versuchsergebnisse für nicht gekerbte Proben transformiert worden. Dadurch war eine ausreichende Versuchspopulation für die Entwicklung einer Materialwöhlerlinie möglich. Mit dieser kann auch für andere stumpfgeschweißte Verbindungen die entsprechende Bauteilwöhlerlinie berechnet werden, ohne weitere umfangreiche und kostspielige Ermüdungsversuche durchzuführen.

Außerdem konnten die Bauteil- und Materialwöhlerlinien für den Kurzzeitfestigkeitsbereich erweitert werden, so dass der gesamte Lastwechselbereich (Kurz-, Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich) rechnerisch erfasst werden kann. Dies ist besonders im Brückengerätebau von Bedeutung, da dort für die teilweise sehr hohen Belastungen nur geringe Lebensdauern gefordert werden.

Zur Verifizierung der ermittelten Materialwöhlerlinien im Kurz-, Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich wurde das Bruchmechanikkonzept herangezogen. Durch Berücksichtigung der plastischen Grenzlast im Restligament kann damit ebenfalls der gesamte Lastwechselbereich erfasst werden. Durch die Kalibration der Anfangsrisslänge anhand der Kerbfälle und aufgrund der sehr guten Übereinstimmung mit den mit Hilfe des Nenn- und Kerbspannungskonzeptes berechneten Wöhlerlinien, konnten die entsprechenden Anfangsrisslängen ermittelt werden, mit denen bruchmechanische Nachweise möglich sind.

Die Ergebnisse der Arbeit liefern einen wirtschaftlichen Vorteil bei der Bemessung einer einseitig stumpfgeschweißten Aluminiumverbindung mit temporärer Badsicherung der Legierung AlZn4,5Mg1 sowie der Legierung AlMgSi0,5 auf Ermüdung. Dies wird besonders für die Entwicklung und Berechnung mobiler Brückengeräte von Bedeutung sein.

SUMMARY

EN 1999-Part 1-3 „Design of aluminium structures-structures susceptible to fatigue“ gives rules for the fatigue assessment using the nominal stress range concept with fatigue strengths represented by S - N -curves.

Such S - N -curves are specified for various common structural details with a validity range of $N > 10^5$; only for some details also the fatigue strengths in the range of 10^3 to 10^5 cycles are given.

For military bridging equipment fatigue requirements are mainly in the range of 10^3 to 10^5 cycles and the most important structural detail is the butt weld, welded from one side only with a temporary backing with full penetration and various forms of post weld treatment (without any or root ground or root and cap ground). These cases are not covered by EN 1999-Part 1-3.

In order to include these three detail-categories in EN 1999-1-3 a test programme has been set up with welded specimens made of the alloys AlZn4,5Mg1 and AlMgSi0,5 which permitted to investigate also the influences of strength (F22, F35 and F41), the post weld heat treatment, the plate thickness and the stress ratio R . The test results have been evaluated using a linear regression to obtain S - N -curves.

In a further step the test results for the notched specimen have been transformed into data without notch effects and separate notch factors using the notch-stress method. From these data material-oriented S - N -curves could be determined that allow to calculate the parameters of S - N -curves for butt weld connections with any structural detailing. In addition the material-oriented S - N -curves and the detail-oriented S - N -curves could be extended to the full range of cycles by the Stüssi-approach so that low cycle fatigue, high cycle fatigue and the endurance limit can be covered by a single presentation of the fatigue resistance curve.

To verify the material-oriented- S - N -curves in the low cycle, high cycle and endurance regions by the fracture mechanics approach, the crack-growth equations for $da/dN \cdot \Delta K$ of Forman, Erdogan and Ratwani have been extended to include the yielding limit for the residual ligament. From calibration studies the initial crack sizes for the various notch cases could be determined and good agreements could be achieved between the S - N -curves obtained from the direct test-evaluation, the notch-stress concept and the fracture mechanics method.

In conclusion the results of the thesis open the door for the fatigue design of aluminium bridging equipments with more realistic data for fatigue strength and with methods that give more flexibility in verifying details not covered by EN 1999-1-3. The results of this new procedures are also more economic.

Inhalt	Seite
SYMBOLE	1
EINLEITUNG	3
1 ALUMINIUM	5
1.1 Allgemeines	5
1.2 Untersuchte Aluminiumlegierungen	6
1.3 Zugehörige Schweißzusatzwerkstoffe	7
1.4 Mechanismen der Festigkeitssteigerung	8
2 PROBEKÖRPER UND MATERIALKENNWERTE	11
2.1 Testmatrix	12
2.2 Statische Festigkeit	13
2.3 Zyklische Festigkeit	14
3 KONZEPTE DER BETRIEBSFESTIGKEITSBERECHNUNG	17
3.1 Experimentelle Untersuchungen und Nennspannungskonzept	19
3.1.1 Versuchsdurchführung	19
3.1.2 Normierte Bauteilwöhlerlinien	20
3.1.3 Auswertung der Versuchsergebnisse	22
3.2 Konzept der örtlich elastischen Beanspruchungen	30
3.2.1 Ermittlung der elastischen Kerbspannung	37
3.2.2 Ermittlung der Ersatzstrukturlängen	43
3.2.3 Resultierende elastische Kerbwirkungszahlen	48
3.2.4 Kerbwirkungszahlen für den elastisch-plastischen Bereich	50
3.2.5 Resultierende Materialwöhlerlinien	54
3.3 Bruchmechanikkonzept	68
3.3.1 Linear-Elastische Bruchmechanik	68
3.3.2 Elastisch-Plastische Bruchmechanik	69
3.3.3 Rissfortschrittsverhalten	71
3.3.4 Lebensdauerberechnung	75
3.3.5 Kennwerte der Bruchmechanik	75
3.3.6 Stetige Rissfortschrittskurve nach Forman, Erdogan und Ratwani	81
3.3.7 Materialkonstanten C_F und m_F	83
3.3.8 Bestimmung der Anfangsrislänge a_0	84
4 ZUSAMMENFASSUNG	87
4.1 Nennspannungskonzept	88
4.2 Kerbspannungskonzept	90
4.3 Rissfortschrittskonzept	92
4.4 Statische Grenzbetrachtung	95
5 AUSBLICK	97
6 LITERATUR	99

7	ANHANG A: STATISCHE MATERIALKENNWERTE.....	109
8	ANHANG B: ZYKLISCHE MATERIALKENNWERTE.....	113
9	ANHANG C: STAIRCASE-DIAGRAMME	117
10	ANHANG D: STATISTIK.....	121
10.1	Lineare Regression nach Basquin.....	121
10.1.1	Lineare Regression bei variabler Neigung b	121
10.1.2	Lineare Regression bei vorgegebener Neigung b	123
10.1.3	Weitere lineare Regressionsfunktionen.....	123
10.2	Nicht-Lineare Regressionsanalyse	123
10.2.1	Lineare Regression bei variabler Neigung λ	124
10.2.2	Lineare Regression bei vorgegebener Neigung λ	124
11	ANHANG E: BAUTEILWÖHLERLINIEN.....	127
12	ANHANG F: AUSWERTUNG DER PROBENGOMETRIE ALLER PROBEN	131
13	ANHANG G: MATERIALWÖHLERLINIEN	135
14	ANHANG H: VERGLEICH DER THEORETISCHEN ZU DEN EXPERIMENTELLEN BAUTEILWÖHLERLINIEN	139
14.1	Neu durchgeführte Versuchsreihen ($R = 0,1$)	139
14.2	Neu durchgeführte Versuchsreihen ($R = -1$).....	145
14.3	Frühere Untersuchungen.....	148
14.3.1	Auswertung ohne $f(R)$ -Korrektur.....	149
14.3.2	Auswertung mit $f(R)$ -Korrektur	153
15	ANHANG I: ANFANGSRISSLÄNGEN	159
15.1	Ohne Berücksichtigung von Eigenspannungen	159
15.2	Berücksichtigung von Eigenspannungen	168

SYMBOLS

$K_f = K_N$	Kerbwirkungszahl [-]
K_t	Kerbformzahl [-]
ρ	Kerbradius [mm]
ρ	spezifische Dichte [g/cm ³]
φ	Nahtanstiegswinkel [°]
ρ^*	Ersatzstrukturlänge [mm]
s	Mehrachsigkeitskoeffizient [-]
ρ_f	fiktiver Kerbradius [mm]
$\Delta\sigma_N$	Nennspannungsschwingbreite [N/mm ²]
$\Delta\sigma_{Kt}$	Kerbspannungsschwingbreite [N/mm ²] = $\Delta\sigma_N \cdot K_t$
$\Delta\sigma_{Kf}$	Kerbwirkungsspannungsschwingbreite [N/mm ²] = $\Delta\sigma_N \cdot K_f$
$\Delta\sigma_D$	Dauerschwingfestigkeit bei $5 \cdot 10^6$ Lastwechseln [N/mm ²]
$\Delta\sigma_C$	Kerbfall = Spannungsschwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln [N/mm ²]
$\Delta\sigma_{LCF}$	Spannungsschwingbreite bei 10^4 Lastwechseln [N/mm ²]
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite oder Doppelspannungsamplitude [N/mm ²]
σ_a	Schwingamplitude oder Spannungsamplitude [N/mm ²]
S	Nennspannung [N/mm ²]
e	Nenndehnung [-]
σ	örtliche Spannung [N/mm ²]
ε	örtliche Dehnung [-]
N	Lastwechselzahl [-]
m	Wöhlerlinienneigung [-]
E	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
α	Wärmeausdehnungskoeffizient [1/K]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
ν	Querkontraktionszahl [-]
G	Schubmodul [N/mm ²]
K'	zyklischer Verfestigungskoeffizient [N/mm ²]
n'	zyklischer Verfestigungsexponent [-]
nba	Schweißnaht beidseitig abgearbeitet
wsa	Schweißnaht auf der Wurzelseite abgearbeitet
nna	Schweißnaht beidseitig nicht abgearbeitet
$f_u = \sigma_Z$	Zugfestigkeit [N/mm ²]
f_y	Streckgrenze [N/mm ²]
$R_{p0,2}$	Festigkeit bei 0,2% Dehnung [N/mm ²]
$P_{\dot{U}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit
5%	5%-Fraktile
50%	50%-Fraktile = Mittelwert
R	Spannungsverhältnis [-]
σ_o	Oberspannung [N/mm ²]
σ_u	Unterspannung [N/mm ²]

Symbole

σ_R	Eigenspannung [N/mm ²]
t	Blechdicke [mm]
a^*	kritischer Abstand [mm]
B	Probenbreite [mm]
w	Nahtbreite [mm]
h	Nahtüberhöhung [mm]
WEZ	Wärmeeinflusszone
GM	Grundmaterial
FE/FEM	Finite-Elemente-Methode
BE/BEM	Boundary-Elemente-Methode
wa	Warmauslagerung
ka	Kaltauslagerung
kfz	kubisch flächenzentriertes Atomgitter
krz	kubisch raumzentriertes Atomgitter
$f(R)$	Korrektur zur Erfassung der Einflüsse aus Mittelspannung und Spannungsverhältnissen kleiner 0,5
$f(t)$	Korrekturfaktor zur Erfassung der Reduzierung der Ermüdungsfestigkeit für Blechdicken von $t > 25\text{mm}$
n	Anzahl Versuche
a	Risstiefe [mm]
c	halbe Rissbreite [mm]
K	Spannungsintensitätsfaktor [MNm ^{-1.5}]
K_{th}	Schwellenwert des Rissfortschritts [MNm ^{-1.5}]
K_c	kritischer Spannungsintensitätsfaktor [MNm ^{-1.5}]
da/dN	Rissgeschwindigkeit [m/LW]
EDZ	Ebener Dehnungszustand
ESZ	Ebener Spannungszustand