

# Anwendung ausgewählter lokaler Konzepte für eine schwingfeste Bemessung von Schweißverbindungen aus Aluminium

Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie  
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur  
(akademischer Grad)

Dr.-Ing.  
(Kurzform)

vorgelegt

von Herrn Maître des sciences et techniques, Dipl.-Ing (FH) Andreas  
Glowig

geboren am 26.02.1980

in Schwäbisch Gmünd

Gutachter.: Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Biermann, Freiberg  
Prof. Dr.-Ing. Cetin Morris Sonsino, Darmstadt  
Dr. rer. Nat. Klaus Lempenauer, Ulm

Tag der Verleihung: 08.07.2009



Berichte aus dem Maschinenbau

**Andreas Glowig**

**Anwendung ausgewählter lokaler Konzepte  
für eine schwingfeste Bemessung von  
Schweißverbindungen aus Aluminium**

Shaker Verlag  
Aachen 2009

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Freiberg, Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8540-1

ISSN 0945-0874

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im Daimler Forschungsprojekt „Betriebsfestigkeitsvorhersage nahtgeschweißter Fahrwerks- und Rohbaukomponenten“ am Forschungszentrum Ulm.

Für die wissenschaftliche Betreuung und die Übernahme des Referates gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Biermann, TUBA Freiberg, mein besonderer Dank. Bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützte er mich stets mit wissenschaftlichen Diskussionen, Beratungen und Anregungen, die den Fortgang meiner Arbeit förderten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Cetin Morris Sonsino, LBF Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit Darmstadt, möchte ich für die Übernahme des Koreferates, die wohlwollende Unterstützung bei der Erstellung meiner Arbeit, sowie für die zielführenden engagierten Diskussionen danken.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner, Hochschule Mittweida, der mir während seiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der TUBA Freiberg und als Professor der Hochschule Mittweida immer mit Rat und Tat zur Seite stand und mir bei der Erstellung dieser Arbeit wertvolle Anregungen lieferte.

Herrn Dr. rer. nat. Klaus Lempenauer möchte ich besonders danken, da er mir die Möglichkeit zur Promotion bei Daimler im Team Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung eröffnete. Meinen Kollegen des Forschungsteams Betriebsfestigkeit, allen voran Herrn Reinhard Weisner und Herrn Andreas Schäufele, möchte ich herzlich danken. Desweiteren haben mich Herr Prof. Dr.-Ing. Steffen Greuling, Herr Dr. rer. nat. Matthias Martin, Herr Dr.-Ing. Andreas Ruf und Herr Martin Schmidt, sowie alle Kollegen des Teams Betriebsfestigkeit bei der Durchführung meiner Arbeit unterstützt und mich mit fruchtbaren Diskussionen begleitet.

Den Mitarbeitern des Teams Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung gilt mein Dank für die freundliche Aufnahme und die Unterstützung während meiner Tätigkeit in der Daimler Forschung.

Mein ganz besonderer Dank geht an meine Eltern und Freunde, die mich während meiner Zeit als Doktorand und in der Folge immer unterstützten und ermutigten.

## I. Abstract

Die Eignung von lokalen Konzepten zur Lebensdauerabschätzung von MIG-geschweißten Fahrwerksbauteilen wurde in dieser Arbeit untersucht und bewertet.

Verglichen wurden das Kerbspannungskonzept mit einem fiktiven Ersatzradius von  $\rho_f=0,05$  mm, das Kerbdehnungskonzept mit einem fiktiven Ersatzradius von  $\rho_f=0,05$  mm (basierend auf einer Einheitswöhlerlinie und werkstoffbasiert), das Rissfortschrittskonzept und das Spannungsintensitätskonzept.

Dazu wurden Schwingfestigkeitsuntersuchungen an geschweißten T-, Y-, Stumpf- und Überlappstößen aus AlMg3Mn-Blechen (EN 5083) mit verschiedenen Fertigungsimperfectionen, wie zum Beispiel variierenden Spaltmaßen, Blechversätzen und Einbrandtiefen durchgeführt.

Anhand des Versuchsprogramms konnten Einheitswöhlerlinien (Masterwöhlerlinien) abgeleitet werden und die Lebensdauer der Versuche mit den werkstoffbasierten Konzepten abgeschätzt werden. Anhand der einheitlichen Darstellung „abgeschätzte Lebensdauer“ über „experimenteller Lebensdauer“ konnten alle Konzepte anhand des sich ergebenden Streubandes bewertet werden. Das elastisch-plastische Werkstoffverhalten des Grundwerkstoffes und des Schweißgutes wurden im dehnungsgeregelten Versuch an ungekerbten Proben ermittelt. Das Rissfortschrittsverhalten der beiden Werkstoffzustände wurde an gekerbten Blechproben bestimmt.

Die lokale Geometrie der Proben sowie das Versagensbild der vorliegenden Stoßformen wurde in makro- und mikroskopischen Untersuchungen der geschweißten Proben detailliert abgebildet. Diese Ergebnisse flossen in die Spannungsberechnungen der einzelnen Konzepte ein, um das Versagen sowie den Rissausgangsort der Schwingfestigkeitsuntersuchungen mit in die Berechnung mit einzubeziehen. Mit Eigenspannungsmessungen an den Stoßgeometrien sowie an Bauteilen des gleichen Werkstoffs konnte gezeigt werden, dass Eigenspannungen keinen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten der vorliegenden Schweißnähte haben.

Zur Validierung der Konzepte wurden an einem Fahrwerksbauteil aus AlMg3Mn (EN 5083) Einstufenversuche durchgeführt. Die metallographische Untersuchung der ermüdeten Bauteile ergab ein Versagen der Bauteile im Grundwerkstoff des Bauteils.

Die Bauteilversuche wurden mit den Einheitswöhlerlinien der Probenversuche und den werkstoffbasierten Konzepten abgeschätzt.

Anhand der Bewertung der Streubänder der Probenversuche und der Bauteilversuche erwies sich das Kerbspannungskonzept mit einem fiktiven Ersatzradius von  $\rho_f=0,05$  mm (Einheitswöhlerlinie als Bemessungsgrundlage) als am besten geeignetes Konzept zur Abschätzung der Lebensdauer von Schweißnähten. Das örtliche Kerbdehnungskonzept mit einem fiktiven Ersatzradius von  $\rho_f=0,05$  mm (werkstoffbasiert) zeigte sich als am besten geeignet zur Abschätzung der Lebensdauer des Grundwerkstoffes.



## II. Abkürzungsverzeichnis

### Formelzeichen:

$a_0$  : Anfangsrisstiefe

$a_{\max}$  : maximale Risstiefe

$a_{\text{krit}}$  : kritische Risstiefe, die zum Gewaltbruch führt

$b$  : zyklischer Spannungsexponent

$c$  : zyklischer Dehnungsexponent

$c$  : elastischer Übertragungsfaktor

$C$  : Y-Achsenabschnitt der Wöhlerlinie

$C$  : Bruchmechanische Werkstoffkonstante

$da/dN$  : Risswachstumsgeschwindigkeit

$D$  : Schädigungswert

$DG$  : Durchschweißgrad

$ES$  : Eigenspannungen

$f$  : Korrekturformel zur Bestimmung des SIF

$f_{\text{korr}}$  : Korrekturfaktor für Kerbspannung

$F_a$  : Kraftamplitude

$F_D$  : Kraftamplitude bei  $N=2 \times 10^6$

$FE$  : Finites Element

$FEA$  : Finite Element Analyse

$FEM$  : Finite Element Methode

$HAT$  : Hinterachsträger

$H_{TF}$  : Teilfolgenumfang

k : Neigung der Wöhlerlinie

$k^*$  : Neigung der Wöhlerlinie ab dem Abknickpunkt nach Haibach

$K'$  : zyklischer Verfestigungskoeffizient

$K_f$  : Kerbwirkungszahl

$K_N$  : Kerbfaktor

$K_t$  : Kerbformzahl

L : Last

$L_a$  : Lastamplitude

M : Mittelspannungsempfindlichkeit

$M_E$  : Eigenspannungsempfindlichkeit

$n'$  : zyklischer Verfestigungsexponent

N : Schwingspiel

$N_B$  : Schwingspiele bis zum Versagen

$N_i$  : ertragbare Schwingspiele bei  $\sigma_{a,i}$

$N_A$  : Schwingspiele bis zum technischen Anriss

$N_{A10\%}$  : Schwingspiele bis zum technischen Anriss (Kraftabfall um 10%)

$N_K$  : Knickschwingspielzahl

$N_{exp}$  : experimentelle Schwingspiele unter variabler Amplitude

R : Lastverhältnis

SIF : Spannungsintensitätsfaktor

t : Blechdicke

$T_N$  : Streuband (Lastwechsel)

$T_\sigma$  : Streuband (Spannung)

WEZ : Wärmeeinflusszone

x : Einbrand

griechische Buchstaben:

$\Delta D_i$  : Schädigungswert eines Schwingspiels

$\Delta K_0$  : Schwellwert des Risswachstums

$\Delta K_I$  : Spannungsintensitätsfaktor

$\Delta K_{\text{äq,D}}$  : äquivalenter Spannungsintensitätsfaktor nach Erdogan und Sih

$\varepsilon_a$  : Dehnungsamplitude

$\varepsilon_{a,e}$  : elastischer Anteil der Dehnungsamplitude

$\varepsilon_{a,p}$  : plastischer Anteil der Dehnungsamplitude

$\varepsilon_{a,t}$  : Gesamtdehnungsamplitude

$\varepsilon_D$  : Dehnungsamplitude (bei  $N=2 \times 10^6$ ), Abknickpunkt der Wöhlerlinie

$\varepsilon'_f$  : zyklischer Dehnungskoeffizient

$\varepsilon_K$  : Kerbdehnung

$\varepsilon_{Ka}$  : Kerbdehnungsamplitude

$\varepsilon_{\text{max}}$  : maximale Dehnungsamplitude

$\varepsilon_{\text{min}}$  : minimale Dehnungsamplitude

$\sigma_a$  : Spannungsamplitude

$\sigma'_f$  : zyklischer Spannungskoeffizient

$\sigma_{\text{HS}}$  : Hot-Spot-Spannung

$\sigma_K$  : Kerbspannung

$\sigma_{Ka}$  : Kerbspannungsamplitude

$\sigma_m$  : Mittelspannung

$\sigma_{max}$  : maximale Spannungsamplitude

$\sigma_{min}$  : minimale Spannungsamplitude

$\sigma_{nenn}$  : Nennspannung

$\sigma_{NK}$  : Spannungsamplitude (bei  $N=2 \times 10^6$ ), Abknickpunkt der Wöhlerlinie

$\sigma_W$  : Wechsellastspannungsamplitude ( $R=-1$ )

$\rho$  : reeller Kerbradius

$\rho^*$  : Mikrostützwirkung Ersatzstrukturlänge

$\rho_f$  : fiktiver Kerbradius

$\theta$  : Rissausbreitungswinkel

### III. Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik .....	4
2.1	Konzepte zur schwingfesten Auslegung von Schweißverbindungen.....	4
2.2	Nennspannungskonzept.....	5
2.3	Strukturspannungskonzept.....	7
2.4	Kerbgrundkonzepte .....	9
2.4.1	Kerbdehnungskonzept .....	9
2.4.2	Zyklisches Werkstoffverhalten .....	11
2.4.3	Kerbdehnungsberechnung.....	12
2.4.4	Kerbspannungskonzept nach Radaj .....	14
2.4.5	Mikrostützwirkung .....	15
2.4.6	Ersatzstrukturlänge nach Neuber.....	16
2.4.7	Ersatzstrukturlänge nach Radaj.....	18
2.4.8	Kerbspannungskonzept mit fiktivem Ersatzradius nach Seeger .....	20
2.4.9	Lebensdauerabschätzung mit dem Kerbspannungskonzept .....	22
2.4.10	Werkstoffvolumenkonzept .....	23
2.5	Bruchmechanikkonzept .....	23
2.5.1	Berechnung der K-Lösung .....	24
2.5.2	Spannungsintensitätsfaktor-Konzept .....	25
2.5.3	Rissfortschrittskonzept.....	27
2.6	Schadensparameter .....	29
2.7	Lebensdauerabschätzung bei variablen Amplituden .....	29
2.8	Mittelspannungseinfluss auf die Schwingfestigkeit.....	31
2.9	Einfluss von Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit .....	32
2.10	Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Al-Schweißverbindungen .....	36

2.11	Folgerungen für die vorliegende Arbeit .....	39
3	Experimentelles .....	41
3.1	Versuchswerkstoff .....	41
3.2	Probengeometrien .....	42
3.3	Fertigungsimperfectionen beim Schweißen.....	43
3.4	Probenplan .....	44
3.5	Wöhlerversuch.....	47
3.6	Anrisserkennung im Wöhlerversuch .....	48
3.7	Ermittlung der zyklischen Werkstoffkennwerte .....	50
3.8	Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte .....	52
3.9	Einstufenversuch an einem Hinterachsträger .....	53
3.10	Anrisserkennung im Bauteilversuch .....	54
3.11	Eigenspannungsanalyse nach der Bohrlochmethode .....	55
4	V Versuchsergebnisse .....	57
4.1	Charakterisierung des Werkstoffs.....	57
4.1.1	Gefüge .....	57
4.1.2	Porosität.....	58
4.1.3	Härteverteilung.....	59
4.2	Schweißimperfectionen .....	60
4.3	Verhalten von Eigenspannungen unter Schwingbeanspruchung .....	61
4.4	Wöhlerversuche.....	63
4.4.1	T-Stoß .....	63
4.4.2	Versagensstellen der T-Stöße .....	66
4.4.3	Y-Stoß.....	68
4.4.4	Versagensstellen der Y-Stöße .....	70
4.4.5	Überlappstoß .....	71
4.4.6	Versagensstellen der Überlappstöße.....	72
4.4.7	Stumpfstoß.....	72

4.4.8	Versagensstellen der Stumpfstöße .....	74
4.4.9	Mittelspannungseinfluss.....	76
4.4.10	Zusammenfassung der Wöhlerlinien .....	77
4.5	Zyklische Werkstoffkennwerte .....	79
4.5.1	Zyklisches Spannungs-Dehnungsverhalten.....	79
4.5.2	Dehnungswöhlerlinie.....	81
4.6	Bruchmechanische Kennwerte .....	84
4.7	Bruchflächenanalyse .....	85
4.8	Bauteilversuch Hinterachsträger HAT 211 .....	86
4.8.1	Metallographische Charakterisierung der Fertigungsimperfectionen ....	86
4.8.2	Härtemessung.....	87
4.8.3	Eigenspannungsanalyse am Hinterachsträger Baureihe 211 .....	88
4.8.4	Lokale Dehnungsverteilung.....	89
4.8.5	Versagensanalyse .....	91
4.8.6	Wöhlerversuch am HAT 211 .....	92
4.9	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse .....	93
5	Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse mit lokalen Konzepten...	95
5.1	Kerbspannungskonzept mit fiktivem Ersatzradius nach Seeger .....	96
5.1.1	Vernetzung.....	96
5.1.2	Abgleich der Steifigkeit zwischen Versuch und Berechnung .....	98
5.1.3	Maximale Kerbspannungen .....	99
5.1.4	Ableitung der Kerbspannungswöhlerlinie .....	100
5.1.5	Ableitung eines Streubandes für die Kerbspannungswöhlerlinie .....	103
5.2	Kerbdehnungskonzept.....	104
5.2.1	Ableitung der Kerbdehnungswöhlerlinie.....	104
5.2.2	Ableitung eines Streubandes für die Kerbdehnungswöhlerlinie .....	107
5.2.3	Ableitung eines Streubandes für das örtliche Kerbdehnungskonzept. 108	

5.3	Bruchmechanikkonzept .....	109
5.3.1	Vernetzung.....	109
5.3.2	Spannungsintensitätsfaktoren der Stoßformen .....	112
5.3.3	Ableitung der $\Delta K_{\text{aq}}$ -Wöhlerlinie.....	114
5.3.4	Ableitung eines Streubandes für die $\Delta K_{\text{aq}}$ -Wöhlerlinie .....	115
5.3.5	Ableitung eines Streubandes für das Rissfortschrittskonzept .....	116
5.4	Übersicht und Vergleich der lokalen Konzepte.....	118
6	Anwendung der lokalen Konzepte auf den Bauteilversuch.....	121
6.1	Kerbspannungskonzept.....	121
6.1.1	Vernetzung.....	121
6.1.2	Maximale Kerbspannung .....	122
6.1.3	Abschätzung der Lebensdauer des Hinterachsträgers mit den auf Einheitswöhlerlinien basierenden Konzepten .....	123
6.2	Abschätzung der Anrisslebensdauer mit dem Kerbdehnungskonzept.....	127
6.3	Bruchmechanikkonzept .....	129
6.3.1	Bestimmung der Spannungsintensität .....	129
6.3.2	Abschätzung der Rissfortschrittslebensdauer .....	130
6.4	Übersicht und Vergleich der lokalen Konzepte.....	132
7	Fazit und Zusammenfassung .....	134
7.1	Versuchsergebnisse und Auswertung der Probenversuche.....	134
7.2	Versuchsergebnisse und Auswertung der Bauteilversuche.....	136
7.3	Fazit.....	139
7.4	Ausblick.....	141
8	Literaturverzeichnis .....	144
9	Anhang.....	150
9.1	Probengeometrien für Wöhlerversuche .....	150
9.2	Versuchsaufbauten der Stoßgeometrien .....	153
9.3	Schweißparameter der Stoßformen.....	154



9.4	Härtescans .....	155
9.5	Probenform zur Ermittlung zyklischer Werkstoffkennwerte nach Prüf und Dokumentationsrichtlinie für Al [52].....	158
9.6	Versuchsaufbau zur Ermittlung zyklischer Werkstoffkennwerte .....	159
9.7	Bruchmechanikprobe.....	160
9.8	Abschätzung mit der $\Delta K_{\text{aq}}$ -Wöhlerlinie.....	161
9.9	Abschätzung mit der Kerbdehnungswöhlerlinie.....	163
10	Bildverzeichnis.....	165
11	Tabellenverzeichnis .....	172