

Ermüdung von Sinterstählen in Abhängigkeit vom hochbeanspruchten Volumen und Spannungsverhältnis

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Santino Keusemann

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing P. Beiss
Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing C. Broeckmann
Tag der mündlichen Prüfung: 19. August 2014

Diese Dissertation ist auf den Internetsseiten der Universitätsbibliothek online
verfügbar.

Werkstoffanwendungen im Maschinenbau
hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann

Band 5

Santino Keusemann

**Ermüdung von Sinterstählen in Abhängigkeit vom
hochbeanspruchten Volumen und Spannungsverhältnis**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3236-9

ISSN 2195-2981

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftler Mitarbeiter am Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing P. Beiss gilt mein besonderer Dank für die Anregungen zu dieser Arbeit und die umfassende Betreuung und Unterstützung.

Ich danke weiterhin Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann, der freundlicherweise als Berichter dieser Arbeit tätig war, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Jacobs für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. F. Klocke für die Übernahme des Beisitzes.

Den Kollegen danke ich für die schöne gemeinsame Zeit, allen voran Herrn W. Hildebrandt der immer ein offenes Ohr für mich hatte. Mein besonderer Dank gilt auch Herrn F. Klubberg, Frau R. Peters und Herrn U. Mohr, von denen ich durch ihren reichen Erfahrungsschatz viel lernen konnte.

Meiner Familie möchte ich einen ganz besonderen Dank aussprechen. Durch deren dauerhafte Unterstützung und Vertrauen während meines gesamten Lebens ist ein erfolgreicher Abschluss dieser Arbeit erst möglich geworden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen, Stand der Technik und Zielsetzung	2
2.1. Grundlagen	2
2.1.1. Sinterstähle für Strukturbauteile	2
2.1.2. Ermüdung	4
2.2. Stand der Technik	7
2.2.1. Erfassung des Größeneinflusses durch Verwendung von Stützziffern	7
2.2.2. Behandlung des statistischen Größeneinflusses	9
2.3. Zielsetzung und Motivation	12
3. Probenherstellung und Versuchsdurchführung	13
3.1. Proben- und Bauteilherstellung	13
3.2. Statische Kennwerte	17
3.3. Prüfmittel für die Ermüdungsprüfung	17
3.4. Metallografische Dokumentation	24
4. FE-Berechnungen	28
4.1. Grundlagen und Methoden	28
4.2. Randbedingungen und Materialparameter	29
4.3. Bestimmung der Formzahlen und Lastübertragungsfaktoren	31
4.4. Hochbeanspruchte Volumina und Spannungintegrale	36
5. Experimentelle Ergebnisse und Interpretation	40
5.1. Versuchsergebnisse	40
5.2. Haigh-Diagramme	46
5.2.1. Haigh-Diagramme in klassischer Darstellung	46
5.2.2. Abhängigkeiten der Ermüdungsfestigkeiten	50
5.2.3. Kontinuierliche Haigh-Diagramme	54
5.3. Bruchflächenbetrachtung im Rasterelektronenmikroskop (REM)	56
6. Bewertung und Vergleich verschiedener Ansätze	61
6.1. Dreiparametrische Weibull-Verteilung und K-q-Ansatz	61
6.2. e-Funktionen-Ansatz	74
6.3. Bauteilbewertung	87
6.3.1. Bauteilergebnisse	87
6.3.2. Berechnung und Beurteilung	88
7. Zusammenfassung	94

A. Auswertungen mit der Weibull-Verteilung und dem K-q-Ansatz	102
B. Auswertungen mit dem ϵ-Funktionen-Ansatz	118
C. FEM-Dokumentation	125
C.1. Proben	125
C.1.1. Axialbeanspruchung	125
C.1.2. Biegebeanspruchung	132
C.1.3. Torsionsbeanspruchung	140
C.2. Bauteile	147
D. Dokumentation der Bruchflächen mit dem REM	151
E. Wöhler-Diagramme und Versuchsdaten	162
E.1. Atomet-4901	162
E.2. Distaloy-AE	189
E.3. Bauteile	217
E.4. Weibull-Exponenten	226

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
a	$[-]$	Regressionsparameter des K-q-Ansatzes
$A_{ref,st}$	$[-]$	Referenzfläche
$A_{\sigma,st}$	$[-]$	hochbeanspruchte Fläche
α	$[-]$	Regressionsparameter des e -Funktionen-Ansatzes
\bar{b}	$[mm]$	Probenbreite
b	$[-]$	Regressionsparameter des K-q-Ansatzes
β_{σ}	$[-]$	Kerwirkungszahl
c	$[-]$	Regressionsparameter des K-q-Ansatzes
C	$[-]$	Regressionsparameter aus der Basquin-Gleichung
d	$[-]$	Regressionsparameter des K-q-Ansatzes
$\Delta\sigma_{A0}$	$[MPa]$	Grenzfestigkeit der dreiparametrischen Weibull-Verteilung
f	$[-]$	Grenze der HBV-Hüllfläche
F	$[-]$	metallographischer Formfaktor
$F(u)$	$[-]$	kumulative Normalverteilung
i	$[-]$	Zählvariable
h	$[mm]$	Probenhöhe
HBV	$[mm^3]$	hochbeanspruchtes Volumen
J_t	$[mm^4]$	Flächenträgheitsmoment bei Torsion
k	$[-]$	Basquin-Exponent
\bar{k}	$[-]$	Zählvariable
k_{st}	$[-]$	Exponent der statistischen Stützziffer
K_t	$[-]$	Formzahl
K_t^*	$[-]$	Lastübertragungsfaktor für Proben unter Torsion
K_q	$[-]$	Regressionsparameter des K-q-Ansatzes
κ	$[-]$	Regressionsparameter des e -Funktionen-Ansatzes
n	$[-]$	Exponent der dreiparametrischen Weibull-Verteilungen
\bar{n}	$[-]$	Exponent der zweiparametrischen Weibull-Verteilungen
n_{bm}	$[-]$	bruchmechanische Stützziffer
n_g	$[-]$	Gesamtanzahl der Proben
n_{st}	$[-]$	statistische Stützziffer
n_{σ}	$[-]$	gesamte Stützziffer
n_{vm}	$[-]$	verformungsmechanische Stützziffer
N	$[-]$	Schwingspielzahl
N_k	$[-]$	Knickschwingspielzahl
N_g	$[-]$	Grenzschwingspielzahl
m	$[-]$	Exponent des Spannungintegrals
m_{wb}	$[-]$	Weibullexponent auf Basis des Streubandes
m_{ρ}	$[-]$	Dichteexponent
R	$[-]$	Spannungsverhältnis
r	$[-]$	Korrelationskoeffizient
ρ	$[g/cm^3]$	Dichte

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
s_g	[–]	Regressionsparameter des Spannungsgradienten-Ansatzes
SI	[mm^3]	Spannungsintegral
σ	[MPa]	Spannung
σ_a	[MPa]	Spannungsmplitude
σ_A	[MPa]	dauerfeste Amplitude
$\sigma_{A,ref}$	[MPa]	Referenzspannung der dreiparametrischen Weibull-Verteilung
σ_b	[MPa]	Biegespannung
σ_1	[MPa]	erste Hauptnormalspannung
$\sigma_{1,max}$	[MPa]	maximale erste Hauptnormalspannung
σ_O	[MPa]	Oberspannung
σ_U	[MPa]	Unterspannung
$\sigma_{W,zd}$	[MPa]	Zug-Druck-Wechselfestigkeit der Probe
σ_{WK}	[MPa]	Wechselfestigkeit des Bauteils unter Normalspannungen
σ_0	[MPa]	Grenzfestigkeit im e -Funktionen-Ansatz
$\bar{\sigma}_0$	[MPa]	Regressionsparameter der zweiparametrischen Weibull-Verteilung
T_σ	[–]	Streuspanne im Übergangsbereich
τ	[MPa]	Torsionsschubspannung
P	[–]	Auftrittswahrscheinlichkeit
P_1, P_2		Eigenschaft eines Sinterwerkstoffs
P_B	[–]	Bruchwahrscheinlichkeit
P_U	[–]	Überlebenswahrscheinlichkeit
q	[–]	Regressionsparameter des K-q-Ansatzes
W_b	[mm^3]	Widerstandsmoment bei Biegung
W_t	[mm^3]	Widerstandsmoment bei Torsion
V	[mm^3]	beanspruchtes Volumen
V_0	[mm^3]	Referenzvolumen
V_{80}	[mm^3]	HBV bei einer Abschneidegrenze von 80%
V_{90}	[mm^3]	HBV bei einer Abschneidegrenze von 90%
V_{95}	[mm^3]	HBV bei einer Abschneidegrenze von 95%
$V_{SI(m=25)}$	[mm^3]	HBV unter Verwendung des Spannungsintegrals
ζ^*	[–]	bezogenes Spannungsgefälle

Abbildungsverzeichnis

2.1. Schematische Wöhlerkurve	5
2.2. Schwingungsverlauf bei verschiedenen Spannungsverhältnissen	6
3.1. Probengeometrien 1 bis 7	14
3.2. Zahnräder	16
3.3. Spannpratze für Commonrailmotoren	16
3.4. Axialprüfung	19
3.5. Flachbiegung auf einem Kleinpulser	20
3.6. Maschinen zur Torsionsprüfung	21
3.7. Prüfung der Zahnräder auf Hochfrequenzpulsatoren	23
3.8. Spannpratzenprüfung auf der POZ 0985	24
3.9. Gefüge, Atomet 4901, Probengeometrie Nr. 7	26
3.10. Gefüge, Distaloy AE, Probengeometrie Nr. 7	27
4.1. Probengeometrie Nr. 6 unter Biegung	32
4.2. Torsion der Probengeometrie Nr. 3	34
4.3. K_I^* bei Torsion der Probengeometrie Nr. 3	35
4.4. Verlauf der hochbeanspruchten Volumina über der Probendicke für die Probengeometrien Nr. 6 und Nr. 7	37
5.1. Haigh-Diagramme unter Axialbelastung	47
5.2. Haigh-Diagramme unter Biegung	48
5.3. Haigh-Diagramme bei Torsion	49
5.4. Schematische Wöhlerlinien	50
5.5. Abhängigkeiten der lokal dauerhaft ertragbaren Amplituden bei $R = -5$ und $R = 0$ von der lokal ertragbaren Wechselfestigkeit $R = -1$	52
5.6. Abhängigkeit der lokal dauerhaft ertragbaren Amplitude bei $R = 0.5$ von der lokal ertragbaren Wechselfestigkeit $R = -1$	53
5.7. Kontinuierliche Haigh-Diagramme	56
5.8. Makroskopische Übersicht der Bruchflächen	58
5.9. Atomet-4901, Nr. 1, Biegung, $R = -1$, $\rho = 6.90 \text{ g/cm}^3$, Schwingbruch aus Abb. 5.8(a)	59
5.10. Distaloy-AE, Nr. 6, Torsion, $R = 0$, $\rho = 6.98 \text{ g/cm}^3$, Schwingbruch aus Abb. 5.8(j)	60
6.1. Vergleich der rechnerischen Wechselfestigkeit in Abhängigkeit vom HBV unter Verwendung der dreiparametrischen Weibullverteilung bei 7.0 g/cm^3	63
6.2. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{80} und 7.0 g/cm^3 für $R = 0.5$	68
6.3. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{80} und 7.0 g/cm^3 für $R = 0$	69

6.4. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{80} und 7.0 g/cm^3 für $R = -1$	70
6.5. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{80} und 7.0 g/cm^3 für $R = -5$	72
6.6. 3-D-Darstellung des K-q-Ansatzes unter der Verwendung von V_{80} und 7.0 g/cm^3	73
6.7. Volumenvergleich bei Verwendung des e-Funktionen-Ansatzes bei 7.0 g/cm^3 und $R = -1$	75
6.8. e-Funktionen-Ansatz unter Verwendung von V_{80}	77
6.9. Vergleich der Ansätze für Atomet-4901, 7.0 g/cm^3	79
6.10. Vergleich der Ansätze für Distaloy-AE, 7.0 g/cm^3	81
6.11. R-Vergleich mit V_{80} , 7.0 g/cm^3	84
6.12. R-Vergleich mit V_{80} für Atomet-4901, 7.0 g/cm^3	85
6.13. R-Vergleich mit V_{80} für Distaloy-AE, 7.0 g/cm^3	86
6.14. Exemplarische Bauteilberechnung für $R = 0.1$ und 7.0 g/cm^3	93
A.1. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{90} und 7.0 g/cm^3 für $R = 0.5$	103
A.2. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{95} und 7.0 g/cm^3 für $R = 0.5$	104
A.3. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei $V_{SI(m=25)}$ und 7.0 g/cm^3 für $R = 0.5$	105
A.4. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{90} und 7.0 g/cm^3 für $R = 0$	106
A.5. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{95} und 7.0 g/cm^3 für $R = 0$	107
A.6. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei $V_{SI(m=25)}$ und 7.0 g/cm^3 für $R = 0$	108
A.7. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{90} und 7.0 g/cm^3 für $R = -1$	109
A.8. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{95} und 7.0 g/cm^3 für $R = -1$	110
A.9. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{SI} und 7.0 g/cm^3 für $R = -1$	111
A.10. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{90} und 7.0 g/cm^3 für $R = -5$	112
A.11. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{95} und 7.0 g/cm^3 für $R = -5$	113
A.12. Dreiparametrische Weibull-Verteilung bei V_{SI} und 7.0 g/cm^3 für $R = -5$	114
A.13.3-D Darstellung mit dem K-q-Ansatz bei V_{90} und 7.0 g/cm^3	115
A.14.3-D Darstellung mit dem K-q-Ansatz bei V_{95} und 7.0 g/cm^3	116
A.15.3-D Darstellung mit dem K-q-Ansatz bei $V_{SI(m=25)}$ und 7.0 g/cm^3	117
B.1. e-Funktionen-Ansatz bei V_{90} und 7.0 g/cm^3	119
B.2. Abweichungen unter Verwendung des e-Funktionen-Ansatz bei V_{90} und 7.0 g/cm^3	120
B.3. e-Funktionen-Ansatz bei V_{95} und 7.0 g/cm^3	121
B.4. Abweichungen unter Verwendung des e-Funktionen-Ansatz bei V_{95} und 7.0 g/cm^3	122
B.5. e-Funktionen-Ansatz bei $V_{SI(m=25)}$ und 7.0 g/cm^3	123
B.6. Abweichungen unter Verwendung des e-Funktionen-Ansatz bei $V_{SI(m=25)}$ und 7.0 g/cm^3	124
C.1. Probe Nr. 1 unter Axiallast	126
C.2. Probe Nr. 2 unter Axiallast	127
C.3. Probe Nr. 3 unter Axiallast	128
C.4. Probe Nr. 5 unter Axiallast	129
C.5. Probe Nr. 6 unter Axiallast	130

Abbildungsverzeichnis

C.6. Probe Nr. 7 unter Axiallast	131
C.7. Probe Nr. 1 unter Biegung	133
C.8. Probe Nr. 2 unter Biegung	134
C.9. Probe Nr. 3 unter Biegung	135
C.10. Probe Nr. 4 unter Biegung	136
C.11. Probe Nr. 5 unter Biegung	137
C.12. Probe Nr. 6 unter Biegung	138
C.13. Probe Nr. 7 unter Biegung	139
C.14. Probe Nr. 1 unter Torsion	141
C.15. Probe Nr. 2 unter Torsion	142
C.16. Probe Nr. 3 unter Torsion	143
C.17. Probe Nr. 5 unter Torsion	144
C.18. Probe Nr. 6 unter Torsion	145
C.19. Probe Nr. 7 unter Torsion	146
C.20. Großes Zahnrad	148
C.21. Kleines Zahnrad	149
C.22. Spannpratze	150
D.1. Bruchfläche, Atomet-4901, Nr.1, Biegung, $R = 0$, Schwingbruch aus Abb. 5.8b	152
D.2. Bruchfläche, Atomet-4901, Nr. 1, Torsion, $R = 0$, Schwingbruch aus Abb. 5.8c	153
D.3. Bruchfläche, Atomet-4901, Nr. 6, Torsion, $R = 0$, Schwingbruch aus Abb. 5.8d	154
D.4. Bruchfläche, Atomet-4901, Nr. 7, Biegung, $R = -1$, Schwingbruch aus Abb. 5.8e	155
D.5. Bruchfläche, Atomet-4901, Nr. 7, Biegung, $R = 0$, Schwingbruch aus Abb. 5.8f	156
D.6. Bruchfläche, Distaloy-AE, Nr. 1, Biegung, $R = -1$, Schwingbruch aus Abb. 5.8g	157
D.7. Bruchfläche, Distaloy-AE, Nr. 1, Biegung, $R = 0$, Schwingbruch aus Abb. 5.8h	158
D.8. Bruchfläche, Distaloy-AE, Nr. 1, Torsion, $R = 0$, Schwingbruch aus Abb. 5.8i	159
D.9. Bruchfläche, Distaloy-AE, Nr. 7, Biegung, $R = -1$, Schwingbruch aus Abb. 5.8k	160
D.10. Bruchfläche, Distaloy-AE, Nr. 7, Biegung, $R = 0$, Schwingbruch aus Abb. 5.8l	161

Tabellenverzeichnis

3.1. Legierungszusammensetzungen	13
3.2. Proben und Bauteilherstellung bei den Firmen	15
3.3. Proben- und Bauteildichten in den Projekten	15
3.4. Maße der Zahnräder	16
3.5. Härten und Zugversuchsergebnisse	18
3.6. Formfaktoren der Poren	25
4.1. Elementgrößen zur Berechnung von Proben und Bauteilen	30
4.2. Materialparameter	31
4.3. Hochbeanspruchte Volumina in Abhängigkeit von Geometrie und Belastung	38
4.3. Hochbeanspruchte Volumina in Abhängigkeit von Geometrie und Belastung	39
5.1. Versuchsergebnisse bei $R = 0.5$	40
5.1. Versuchsergebnisse bei $R = 0.5$	41
5.2. Versuchsergebnisse bei $R = 0$	42
5.2. Versuchsergebnisse bei $R = 0$	43
5.3. Versuchsergebnisse bei $R = -1$	43
5.3. Versuchsergebnisse bei $R = -1$	44
5.4. Versuchsergebnisse bei $R = -5$	45
5.5. Regressionsparameter und Korrelationskoeffizienten der Daten aus den Ab-	
bildungen 5.5 und 5.6	53
5.6. Dichte-Exponenten für Gl. 5.3	54
5.7. Regressionsparameter zu Gl. 5.7 und Gl. 5.8	55
6.1. Über das Spannungsverhältnis gemittelte Korrelationskoeffizienten der drei-	
parametrischen Weibullansätze nach Gl. 6.3	62
6.2. Regressionsparameter in Gl. 6.3 und Korrelationskoeffizienten für Atommet-	
4901 bei 7.0 g/cm^3	64
6.3. Regressionsparameter in Gl. 6.3 und Korrelationskoeffizienten für Distaloy-	
AE bei 7.0 g/cm^3	65
6.4. Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten für den e -Funktionen-Ansatz	74
6.5. Regressionsparameter des e -Funktionen-Ansatzes für Atommet-4901	76
6.6. Regressionsparameter des e -Funktionen-Ansatzes für Distaloy-AE	76
6.7. Abweichungen der Ansätze bei Atommet-4901	82
6.8. Abweichungen der Ansätze bei Distaloy-AE	83
6.9. FEM-Ergebnisse der Bauteile	87
6.10. Versuchsergebnisse der Bauteile aus Atommet-4901	88
6.11. Versuchsergebnisse der Bauteile aus Distaloy-AE	88

6.12. Mittlere Abweichung der berechneten Bauteilfestigkeiten von den Messwerten in Abhängigkeit von der Berechnungsmethode	90
6.13. Relative Abweichungen für die drei Berechnungsmethoden	92
E.1. Weibull-Exponenten auf Basis der Streubänder zur Bestimmung des Exponenten des Spannungsintegrals	226
E.1. Weibull-Exponenten auf Basis der Streubänder zur Bestimmung des Exponenten des Spannungsintegrals	227
E.2. Übrige Weibull-Exponenten auf Basis der Streubänder	227