

Beitrag zur betriebsfesten Auslegung von Schraubenverbindungen auf Grundlage moderner Betriebsfestigkeitskonzepte

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Oliver Weber

aus Siegen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Christina Berger
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka
Tag der Einreichung:	03.05.2010
Tag der mündlichen Prüfung:	29.06.2010

Darmstadt 2010

D17

Berichte aus der Werkstofftechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Christina Berger

Band 1/2010

Jens Oliver Weber

**Beitrag zur betriebsfesten Auslegung von
Schraubenverbindungen auf Grundlage
moderner Betriebsfestigkeitskonzepte**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2010

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9291-1

ISSN 1617-3805

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

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Deutschen Schraubenverbandes e.V. und am Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde (IfW) der Technischen Universität Darmstadt.

Zunächst einmal möchte ich mich bei meinen Eltern - leider ist mein Vater allzu früh verstorben - bedanken, die es mir ermöglicht haben, dieses Studium durchzuführen. Ein ganz besonderer und herzlicher Dank gilt meiner Frau und meiner Tochter, die mir die Voraussetzung geschaffen und die notwendige Unterstützung zur Erstellung dieser Arbeit gegeben haben. Also Leona, Papas Buch ist jetzt endlich fertig.

Der Leiterin des Fachgebiets und Instituts für Werkstoffkunde und der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Darmstadt, Frau Prof. Dr.-Ing. Christina Berger, möchte ich für die Betreuung und Förderung der Arbeit, für die Übernahme der Berichterstattung und vor allem für das in mich gesetzte Vertrauen danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka danke ich für die Übernahme der Mitberichterstattung.

Dem Geschäftsführer des Deutschen Schraubenverbandes e.V. (DSV), Herrn Frank Naumann, möchte ich für die angenehme Zusammenarbeit während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des DSV danken. Er hat mir vor allem in der Schreibphase den Rücken frei gehalten.

Herrn Dr.-Ing. Bruno Kaiser, Leiter des Kompetenzbereichs Bauteilfestigkeit, und Herrn Dr.-Ing. Rainer Landgrebe, Leiter des Kompetenzbereichs Werkstoffanalytik, danke ich für die vielfältigen Anregungen und Fragestellungen sowie für das angenehme Arbeitsumfeld im Laufe meiner Tätigkeit am Institut.

Meinen Zimmergenossen, die mir neben den zahlreichen fachlichen Diskussionen vor allem ein angenehmes, freundschaftliches und oftmals lustiges Arbeitsumfeld geschaffen haben, möchte ich ebenso danken. Daran beteiligt waren vor allem Herr Dr.-Ing. Uwe Arz, Herr Carsten Stolle, Frau Melanie Stephan, Herr Markus Duchardt und Frau Desislava Veleva.

Dank sagen möchte ich natürlich auch allen Mitarbeitern des Fachgebiets und Instituts für Werkstoffkunde, die durch ihr Schaffen einen Beitrag zum Gelingen

dieser Arbeit geleistet haben. Namentlich seien hier stellvertretend für die Kollegen der Abteilung Bauteilfestigkeit Herr Dr.-Ing. Ulrich Wuttke, Frau Prof. Dr.-Ing. Brita Pyttel und Frau Daniela Schwerdt erwähnt.

Wertvolle Anregungen habe ich vor allem in der Fertigstellungsphase von Herrn Wolfgang Haydn von der Robert Bosch GmbH bekommen. Dafür an dieser Stelle recht herzlichen Dank.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinrich Friederich dafür, dass er mir bei der Entscheidung, diesen Weg zu gehen, beratend zur Seite gestanden hat. Er hat quasi die „Verbindung“ zur Schraube hergestellt.

Der für die Betreuung der Forschungsarbeiten zuständige Arbeitskreis des Deutschen Schraubenverbandes, der Arbeitskreis Gemeinschaftsforschung, hat sich vor allem durch die Bereitstellung von Probenmaterial eingebracht. Mein Dank gilt daher dem Vorsitzenden des Arbeitskreises und den beteiligten Firmen. Im Einzelnen sind dies folgende Personen und Firmen:

- Herr Dr.-Ing. Stefan Beyer, Firma ABC-Umformtechnik GmbH, Gevelsberg,
- Herr Dr.-Ing. Volker Dünkel, Fuchs Schraubenwerk GmbH, Siegen,
- Herr Michael Stähler, Firma Dörken MKS-Systeme GmbH & Co. KG, Herdecke,
- Die Herren Bruno Schliwa und Dieter Weckerlei, Firma August Friedberg GmbH, Gelsenkirchen,
- Frau Dr.-Ing. Ina Etzler-Rentrop, Firma Verzinkerei Rentrop GmbH, Plettenberg.

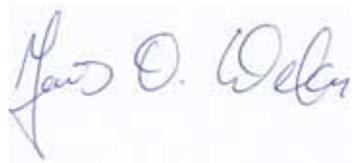
Dankbar erwähnen möchte ich noch alle Studien- und Diplomarbeiter, die durch ihr Schaffen einen Beitrag zur Entstehung dieser Arbeit geleistet haben.

Die Arbeit enthält Forschungsergebnisse, aus dem Forschungsvorhaben Nr. IGF 15381 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV). Das Forschungsvorhaben wurde im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die AiF finanziert.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur mit den in dieser Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe.

Groß-Zimmern, Mai 2010

A handwritten signature in blue ink, reading "Jens O. Weber". The signature is written in a cursive style with a large initial 'J'.

Jens O. Weber

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XX
1. Einleitung.....	1
2. Stand der Technik.....	4
2.1 Grundlagen der Betriebsfestigkeit.....	5
2.1.1 Nennspannungskonzept.....	9
2.1.2 Örtliches Dehnungskonzept.....	14
2.2 Zum Begriff der Dauerfestigkeit bei Schraubenverbindungen.....	17
3. Versuchsplanung und Auswertung.....	20
3.1 Schwingfestigkeitsversuche an Schraubenverbindungen.....	20
3.2 Betriebsfestigkeitsversuche an Schraubenverbindungen.....	22
3.3 Versuchszeitverkürzung (Omission).....	26
3.4 Statistische Versuchsauswertung.....	27
3.4.1 Das Treppenstufenverfahren.....	27
3.4.2 Das Abgrenzungsverfahren.....	28
3.4.3 Die arcsin \sqrt{P} -Transformation.....	29
4. Zielsetzung und Lösungsweg.....	32
5. Eigene Untersuchungen.....	36
5.1 Charakterisierung des Probenmaterials.....	36
5.1.1 Verwendetes Probenmaterial.....	36

5.1.2	Versuchsprogramm	42
5.1.3	Härteprüfung	43
5.1.4	Zugversuche an abgedrehten Schrauben	45
5.1.5	Zugversuche an ganzen Schrauben.....	45
5.1.6	Gewindemaße der Schrauben	46
5.1.7	Gewindemaße der Muttern	48
5.1.8	Werkstoffanalysen der Schrauben und Muttern.....	50
5.2	Wöhlerversuche an Schrauben	52
5.2.1	Ergebnisse der Versuchsreihe vergütungsschwarz VR_VGS_1	55
5.2.2	Ergebnisse der Versuchsreihe phosphatiert-geölt VR_PG_1	56
5.2.3	Ergebnisse der Versuchsreihe Zinklamelle VR_ZL_1	57
5.2.4	Ergebnisse der Versuchsreihe Zinklamelle VR_ZL_II_1.....	58
5.2.5	Ergebnisse der Versuchsreihe feuerverzinkt VR_TZN_1	60
5.2.6	Ergebnisse der Versuchsreihe feuerverzinkt VR_TZN_II_1	61
5.2.7	Ergebnisse der Versuchsreihe sherardisiert VR_SD_1	62
5.2.8	Ergebnisse der Versuchsreihe phosphatiert-geölt VR_PG_2	64
5.2.9	Ergebnisse der Versuchsreihe Zinklamelle VR_ZL_2	65
5.2.10	Ergebnisse der Versuchsreihe feuerverzinkt VR_TZN_2	66
5.2.11	Zusammenfassung der Ergebnisse aus Wöhlerversuchen für eine 70- und 90%-ige Streckgrenzenausnutzung.....	67
5.3	Blockprogrammversuche an Schrauben.....	71
5.3.1	Entwicklung der Teilfolge für die Blockprogrammversuche.....	71
5.3.2	Blockprogrammversuche	74
5.3.3	Ergebnisse der Versuchsreihe phosphatiert-geölt VR_PG_3	78
5.3.4	Ergebnisse der Versuchsreihe Zinklamelle VR_ZL_3	83
5.3.5	Ergebnisse der Versuchsreihe Zinklamelle VR_ZL_II_3.....	88
5.3.6	Ergebnisse der Versuchsreihe feuerverzinkt VR_TZN_3	92
5.3.7	Ergebnisse der Versuchsreihe feuerverzinkt VR_TZN_II_3	98
5.3.8	Ergebnisse der Versuchsreihe sherardisiert VR_SD_3	102
5.3.9	Ergebnisse der Versuchsreihe phosphatiert-geölt VR_PG_4	108
5.3.10	Ergebnisse der Versuchsreihe Zinklamelle VR_ZL_4	112
5.3.11	Ergebnisse der Versuchsreihe feuerverzinkt VR_TZN_4	117

5.3.12	Zusammenfassung der Ergebnisse aus Blockprogrammversuchen für eine 70- und 90%-ige Streckgrenzenausnutzung	123
5.4	Zufallslastenversuche an Schrauben.....	127
5.4.1	Entwicklung der Teilfolge für die Zufallslastenversuche.....	128
5.4.2	Ergebnisse der Versuchsreihe phosphatiert-geölt VR_PG_5	131
5.4.3	Ergebnisse der Versuchsreihe Zinklamelle VR_ZL_5	135
5.4.4	Ergebnisse der Versuchsreihe feuerverzinkt VR_TZN_5	139
5.4.5	Ergebnisse der Versuchsreihe phosphatiert-geölt VR_PG_6	143
5.4.6	Ergebnisse der Versuchsreihe Zinklamelle VR_ZL_6	147
5.4.7	Ergebnisse der Versuchsreihe feuerverzinkt VR_TZN_6	151
5.4.8	Zusammenfassung der Ergebnisse aus Zufallslastenversuchen für eine 70- und 90%-ige Streckgrenzenausnutzung	155
5.5	Versuchszeitverkürzung (Omission)	158
6.	Diskussion der Versuchsergebnisse.....	160
6.1	Diskussion der Wöhlerversuche.....	160
6.1.1	Einfluss der Mittelspannung	164
6.1.2	Beschichtungseinfluss.....	167
6.1.3	Geometrische Einflüsse bei HV-Garnituren	170
6.1.4	Fazit zur Diskussion der Wöhlerversuche	172
6.2	Diskussion der Blockprogramm- und Zufallslastenversuche.....	173
6.2.1	Einfluss der Beschichtung und der Toleranzlage.....	175
6.2.2	Einfluss der Mittelspannung	178
6.2.3	Einfluss der Lastabfolge	183
6.2.4	Fazit zur Diskussion der Blockprogramm- und Zufallslastenversuche.....	186
6.3	Diskussion der Schadensakkumulationsrechnung.....	187
6.3.1	Schadensakkumulationsrechnung bei Blockprogrammversuchen	188
6.3.2	Schadensakkumulationsrechnung bei Zufallslastenversuchen	193
6.3.3	Gesamtbetrachtung zur Schadensakkumulationsrechnung	197
6.3.4	Fazit zur Diskussion der Schadensakkumulationsrechnung.....	199

7.	Handlungsempfehlung.....	201
7.1	Handlungsempfehlung für eine überschlägige rechnerische Bauteilauslegung	201
7.2	Handlungsempfehlung für eine experimentell unterstützte genaue Bauteilauslegung	203
7.3	Handlungsempfehlung zur Bauteilauslegung unter Verwendung des Nachfahrversuches	205
8.	Zusammenfassung.....	206
9.	Ausblick	210
10.	Literaturverzeichnis	211

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: Ermittlung der Schraubenzusatzkraft bei wechselnder Belastung, Bild aus der VDI-Richtlinie 2230 [VDI03].....3

Abbildung 2-1: Übersicht über die relevanten Technikbereiche, in denen Bauteile betriebsfest ausgelegt werden, nach Seeger aus Haibach [Hai06]5

Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Wöhler- und Gaßnerlinie7

Abbildung 2-3: Spannungsdefinitionen an einer Schraube7

Abbildung 2-4: Vorgehensweise bei der Schwingfestigkeitsbestimmung nach dem Nennspannungskonzept9

Abbildung 2-5: Vergleich des getreppten Amplitudenkollektivs mit der Wöhlerlinie für die lineare Schadensakkumulation.....11

Abbildung 2-6: Berechnung der Gaßnerlinie auf Basis der Miner-Regel und ihrer Modifikationen13

Abbildung 2-7: Vorgehensweise für einen Betriebsfestigkeitsnachweis nach dem örtlichen Konzept15

Abbildung 2-8: Verlauf der Ermüdungsfestigkeit bis in den VHCF-Bereich in Abhängigkeit der Kerbschärfe in schematischer Darstellung nach Tanaka [TAM04]18

Abbildung 2-9: Kerbeeinfluss bei 42CrMoS4, Rm = 1100 MPa, Zug-Druck-Wechselbeanspruchung, aus [SP09]18

Abbildung 3-1: Darstellung der Wöhlerkurve21

Abbildung 3-2: Umwandlung der Beanspruchungs-Zeit-Funktion in ein Amplitudenkollektiv24

Abbildung 3-3: Die Gaßnerlinie im Vergleich zur Wöhlerlinie.....25

Abbildung 3-4: Verschiedene Möglichkeiten des Eingriffs in das Belastungskollektiv zur Versuchszeitverkürzung.....27

Abbildung 3-5: Beispielhafter Ablauf des Treppenstufenverfahrens.....28

Abbildung 3-6: Darstellung der Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Schwingspielzahl (Zeitfestigkeitsbereich) bzw. der Spannungsamplitude (Übergangsbereich) nach Dengel [Den75]31

Abbildung 4-1: Blocklasten-Zeit-Verlauf34

Abbildung 4-2: Zufälliger Last-Zeit-Verlauf	34
Abbildung 5-1: Verwendetes Probenmaterial.....	37
Abbildung 5-2: Kenngrößen des metrischen ISO-Gewindes nach DIN 13-19 [DIN99b].....	37
Abbildung 5-3: Kenngrößen von HV-Schraubengarnituren nach DIN 14399-4 [DIN06b] a) Schraube, b) Mutter.....	38
Abbildung 5-4: Härtewerte HV 30 der verwendeten HV-Schrauben	44
Abbildung 5-5: Härtewerte HV 30 der verwendeten HV-Muttern	44
Abbildung 5-6: Ermittelte Dehngrenzen ($R_{p0,2}$), Zugfestigkeiten (R_m) und Bruchdehnungen (A) des verwendeten Probenmaterials	45
Abbildung 5-7: Ermittelte Streckgrenzkräfte ($F_{0,2}$) und Bruchkräfte (F_{max}) der verwendeten Schrauben	46
Abbildung 5-8: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für Schwingversuche an Schrauben	54
Abbildung 5-9: Prinzipskizze des verwendeten Hochfrequenzpulsator (HFP) Bauart Amsler	54
Abbildung 5-10: Wöhlerlinie und experimentell ermittelte Versuchspunkte der Versuchsreihe VR_VGS_1.....	55
Abbildung 5-11: Wöhlerlinie und experimentell ermittelte Versuchspunkte der Versuchsreihe VR_PG_1	56
Abbildung 5-12: Wöhlerlinie und experimentell ermittelte Versuchspunkte der Versuchsreihe VR_ZL_1	58
Abbildung 5-13: Wöhlerlinie und experimentell ermittelte Versuchspunkte der Versuchsreihe VR_ZL_II_1	59
Abbildung 5-14: Wöhlerlinie und experimentell ermittelte Versuchspunkte der Versuchsreihe VR_TZN_1	60
Abbildung 5-15: Wöhlerlinie und experimentell ermittelte Versuchspunkte der Versuchsreihe VR_TZN_II_1	61
Abbildung 5-16: Wöhlerlinie und experimentell ermittelte Versuchspunkte der Versuchsreihe VR_SD_1	62
Abbildung 5-17: Wöhlerlinie und experimentell ermittelte Versuchspunkte der Versuchsreihe VR_PG_2	64

Abbildung 5-18: Wöhlerlinie und experimentell ermittelte Versuchspunkte
 der Versuchsreihe VR_ZL_265

Abbildung 5-19: Wöhlerlinie und experimentell ermittelte Versuchspunkte
 der Versuchsreihe VR_TZN_266

Abbildung 5-20: Ermüdungsbruch (schematisch).....67

Abbildung 5-21: Das Gaußkollektiv72

Abbildung 5-22: Entwicklung des Blockprogramms.....73

Abbildung 5-23: Soll-Ist-Vergleich der verwendeten Teilfolge A.....75

Abbildung 5-24: Wiederholgenauigkeit der verwendeten Prüfeinrichtung76

Abbildung 5-25: Ergebnisse der Blockprogrammversuche und der
 Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe
 VR_PG_378

Abbildung 5-26: Kennzeichnung der Probenbrüche in Abhängigkeit der
 jeweiligen Stufen für die Versuchsreihe VR_PG_3.....80

Abbildung 5-27: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter
 Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_PG_382

Abbildung 5-28: Ergebnisse der Blockprogrammversuche und der
 Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe
 VR_ZL_3.....83

Abbildung 5-29: Kennzeichnung der Probenbrüche in Abhängigkeit der
 jeweiligen Stufen für die Versuchsreihe VR_ZL_3.....85

Abbildung 5-30: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter
 Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_ZL_3.....87

Abbildung 5-31: Ergebnisse der Blockprogrammversuche und der
 Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe
 VR_ZL_II_388

Abbildung 5-32: Kennzeichnung der Probenbrüche in Abhängigkeit der
 jeweiligen Stufen für die Versuchsreihe VR_ZL_II_390

Abbildung 5-33: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter
 Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_ZL_II_3.....92

Abbildung 5-34: Ergebnisse der Blockprogrammversuche und der
 Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe
 VR_TZN_393

Abbildung 5-35: Kennzeichnung der Probenbrüche in Abhängigkeit der jeweiligen Stufen für die Versuchsreihe VR_TZN_3.....	95
Abbildung 5-36: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_TZN_3	97
Abbildung 5-37: Ergebnisse der Blockprogrammversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_TZN_II_3.....	98
Abbildung 5-38: Kennzeichnung der Probenbrüche in Abhängigkeit der jeweiligen Stufen für die Versuchsreihe VR_TZN_II_3.....	100
Abbildung 5-39: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_TZN_II_3.....	102
Abbildung 5-40: Ergebnisse der Blockprogrammversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_SD_3.....	103
Abbildung 5-41: Kennzeichnung der Probenbrüche in Abhängigkeit der jeweiligen Stufen für die Versuchsreihe VR_SD_3.....	105
Abbildung 5-42: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_SD_3.....	107
Abbildung 5-43: Ergebnisse der Blockprogrammversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_PG_4	108
Abbildung 5-44: Kennzeichnung der Probenbrüche in Abhängigkeit der jeweiligen Stufen für die Versuchsreihe VR_PG_4.....	110
Abbildung 5-45: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_PG_4	112
Abbildung 5-46: Ergebnisse der Blockprogrammversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_ZL_4.....	113
Abbildung 5-47: Kennzeichnung der Probenbrüche in Abhängigkeit der jeweiligen Stufen für die Versuchsreihe VR_ZL_4.....	115
Abbildung 5-48: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_ZL_4.....	117

Abbildung 5-49: Ergebnisse der Blockprogrammversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_TZN_4118

Abbildung 5-50: Kennzeichnung der Probenbrüche in Abhängigkeit der jeweiligen Stufen.....120

Abbildung 5-51: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_TZN_4122

Abbildung 5-52: Ausschnitt aus der verwendeten Zufallslastenteilfolge127

Abbildung 5-53: Absolute Häufigkeit der Teilfolge A_R.....130

Abbildung 5-54: Durchmischte Teilfolge A_R.....130

Abbildung 5-55: Ergebnisse der Zufallslastenversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_PG_5131

Abbildung 5-56: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_PG_5134

Abbildung 5-57: Ergebnisse der Zufallslastenversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_ZL_5.....135

Abbildung 5-58: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_ZL_5.....138

Abbildung 5-59: Ergebnisse der Zufallslastenversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_TZN_5139

Abbildung 5-60: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_TZN_5142

Abbildung 5-61: Ergebnisse der Zufallslastenversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_PG_6143

Abbildung 5-62: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_PG_6146

Abbildung 5-63: Ergebnisse der Zufallslastenversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_ZL_6.....147

Abbildung 5-64: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_ZL_6.....	150
Abbildung 5-65: Ergebnisse der Zufallslastenversuche und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_TZN_6	151
Abbildung 5-66: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für die Versuchsreihe VR_TZN_6	154
Abbildung 5-67: Ergebnisse der Blockprogrammversuche mit Omission und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_PG_OM bei einer Mittellast von 70% der Bauteilstreckgrenze	159
Abbildung 5-68: Ergebnisse der Blockprogrammversuche mit Omission und der Schadensakkumulationsrechnung für die Versuchsreihe VR_PG_OM bei einer Mittellast von 90% der Bauteilstreckgrenze	159
Abbildung 6-1: Wöhlerlinien der Versuchsreihen VR_VGS_1, VR_PG_1, VR_ZL_1, VR_ZL_II_1, VR_TZN_1, VR_TZN_II_1 und VR_SD_1, bei einer 70%-igen Mindeststreckgrenzenausnutzung.....	161
Abbildung 6-2: Wöhlerlinien der Versuchsreihen VR_PG_2, VR_ZL_2 und VR_TZN_2, bei einer 90%-igen realen Bauteilstreckgrenzenausnutzung.....	162
Abbildung 6-3: Haigh-Diagramm für die geprüften Schrauben.....	164
Abbildung 6-4: Ermittelte Dauerfestigkeitswerte für in Salzschmelze behandelte, abgebeizte feuerverzinkte und abgebeizte zinklamellenbeschichtete HV-Schrauben	167
Abbildung 6-5: K_t bzw. α_k in Abhängigkeit der Einschraubtiefe und der Schlüsselweite	171
Abbildung 6-6: Übersicht über alle durch Blockprogrammversuche ermittelte Gaßnerlinien	174
Abbildung 6-7: Übersicht über alle durch Zufallslastenversuche ermittelte Gaßnerlinien	175

Abbildung 6-8: Kennzeichnung der Probenbrüche für die Versuchsreihen mit einer Mittellast von 70% der Mindeststreckgrenze in Abhängigkeit der jeweiligen Spannungsamplitude.....180

Abbildung 6-9: Kennzeichnung der Probenbrüche für die Versuchsreihen mit einer Mittellast von 90% der Bauteilstreckgrenze in Abhängigkeit der jeweiligen Spannungsamplitude.....180

Abbildung 6-10: Kennzeichnung der Probenbrüche für die Versuchsreihen mit einer Mittellast von 70% der Mindest- und 90% der Bauteilstreckgrenze in Abhängigkeit der jeweiligen Spannungsamplitude180

Abbildung 6-11: Kennzeichnung der Probenbrüche für die Versuchsreihen mit einer Mittellast von 70% der Mindeststreckgrenze in Abhängigkeit der jeweiligen Spannungsamplitude (normiert)181

Abbildung 6-12: Kennzeichnung der Probenbrüche für die Versuchsreihen mit einer Mittellast von 90% der Bauteilstreckgrenze in Abhängigkeit der jeweiligen Spannungsamplitude (normiert)181

Abbildung 6-13: Kennzeichnung der Probenbrüche für die Versuchsreihen mit einer Mittellast von 70% der Mindest- und 90% der Bauteilstreckgrenze in Abhängigkeit der jeweiligen Spannungsamplitude (normiert).....181

Abbildung 6-14: Gegenüberstellung der Gaßnerlinien aus Blockprogramm- und Zufallslastenversuchen für eine 70%-ige Streckgrenzenausnutzung184

Abbildung 6-15: Gegenüberstellung der Gaßnerlinien aus Blockprogramm- und Zufallslastenversuchen für eine 90%-ige Streckgrenzenausnutzung185

Abbildung 6-16: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für alle Versuchsreihen mit 70%-iger Streckgrenzenausnutzung190

Abbildung 6-17: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für alle Versuchsreihen mit 90%-iger Streckgrenzenausnutzung	191
Abbildung 6-18: Summenhäufigkeit der Schadenssummen aus Blockprogrammversuchen	192
Abbildung 6-19: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für alle Zufallslasten-Versuchsreihen mit 70%-iger Streckgrenzenausnutzung	194
Abbildung 6-20: Verhältnis von berechneter zu experimentell ermittelter Lebensdauer für alle Zufallslasten-Versuchsreihen mit 90%-iger Streckgrenzenausnutzung	195
Abbildung 6-21: Summenhäufigkeit der Schadenssummen aus Zufallslastenversuchen	196
Abbildung 6-22: Summenhäufigkeit der Schadenssummen aus Blockprogramm- und Zufallslastenversuchen.....	198
Abbildung 6-23: Tendenzen des Parameters C für Schrauben in Anlehnung an [Pöt05]	199
Abbildung 7-1: Vorgehensweise bei der Handlungsempfehlung für die überschlägige rechnerische Bauteilauslegung in schematischer Darstellung	202
Abbildung 7-2: Gemäß Handlungsempfehlung berechnete Lebensdauer für verzinkte HV-Schrauben	202
Abbildung 7-3: Vorgehensweise bei der Handlungsempfehlung für die experimentell unterstützte genaue Bauteilauslegung in schematischer Darstellung	204
Abbildung 7-4: Vorgehensweise bei der Handlungsempfehlung für die Bauteilauslegung mittels Nachfahrversuch in schematischer Darstellung	205

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Konzepte der Betriebsfestigkeit nach Seeger [See96].....	7
Tabelle 4-1: Eigenschaften der Versuchsschrauben	33
Tabelle 5-1: Kenngrößen des metrischen ISO-Gewindes nach DIN 13–1 [DIN99a] und DIN 13–19 [DIN99b] mit entsprechenden Zahlenwerte für das metrische ISO-Gewinde M12.....	38
Tabelle 5-2: Kenngrößen von HV-Schraubengarnituren nach DIN 14399–4 [DIN06b] mit entsprechenden Zahlenwerten für die HV- Schraubengarnitur M12x80.....	39
Tabelle 5-3: Festigkeitswerte nach DIN EN ISO 898–1 [DIN07] für die Festigkeitsklasse 10.9	40
Tabelle 5-4: Übersicht über die durchgeführten Versuchsreihen	43
Tabelle 5-5: Gewindemaße der verwendeten Schrauben (Außendurchmesser d).....	47
Tabelle 5-6: Gewindemaße der verwendeten Schrauben (Flankendurchmesser d_2)	47
Tabelle 5-7: Gewindemaße der verwendeten Schrauben (Kerndurchmesser d_3).....	47
Tabelle 5-8: Gewindemaße der verwendeten Muttern (Flankendurchmesser D_2).....	48
Tabelle 5-9: Gewindemaße der verwendeten Muttern (Kerndurchmesser D_1)	49
Tabelle 5-10: FES-Analyse der verwendeten Schrauben (36 CrB4).....	50
Tabelle 5-11: FES-Analyse der verwendeten Muttern mit der Herstellerbezeichnung AF (C 40).....	51
Tabelle 5-12: FES-Analyse der verwendeten Muttern mit der Herstellerbezeichnung FC (37 MnB5)	52
Tabelle 5-13: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Wöhlerversuchen für eine 70- und 90%-ige Bauteilstreckgrenzenausnutzung	68
Tabelle 5-14: Ausgewählte Probenbrüche der Versuchsreihe VR_PG_1	69
Tabelle 5-15: Ausgewählte Probenbrüche der Versuchsreihe VR_PG_2	70
Tabelle 5-16: Durchgeführte Blockprogrammversuche.....	74

Tabelle 5-17: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Blockprogrammversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_PG_3.....	79
Tabelle 5-18: Vergleich der Neigungen von Wöhler- und Gaßnerlinien für die Versuchsreihe VR_PG_3 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	79
Tabelle 5-19: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_PG_3.....	81
Tabelle 5-20: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Blockprogrammversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_ZL_3.....	84
Tabelle 5-21: Vergleich der Neigungen von Wöhler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_ZL_3 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	84
Tabelle 5-22: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_ZL_3.....	86
Tabelle 5-23: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Blockprogrammversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_ZL_II_3.....	89
Tabelle 5-24: Vergleich der Neigungen von Wöhler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_ZL_II_3 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	89
Tabelle 5-25: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_ZL_II_3.....	91

Tabelle 5-26: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wähler- und Blockprogrammversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_TZN_3.....	94
Tabelle 5-27: Vergleich der Neigungen von Wähler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_TZN_3 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	94
Tabelle 5-28: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_TZN_3.....	96
Tabelle 5-29: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wähler- und Blockprogrammversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_TZN_II_3.....	99
Tabelle 5-30: Vergleich der Neigungen von Wähler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_TZN_II_3 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	99
Tabelle 5-31: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_TZN_II_3.....	101
Tabelle 5-32: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wähler- und Blockprogrammversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_SD_3.....	104
Tabelle 5-33: Vergleich der Neigungen von Wähler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_SD_3 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	104
Tabelle 5-34: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_SD_3.....	106

Tabelle 5-35: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Blockprogrammversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_PG_4.....	109
Tabelle 5-36: Vergleich der Neigungen von Wöhler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_PG_4 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	109
Tabelle 5-37: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_PG_4.....	111
Tabelle 5-38: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Blockprogrammversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_ZL_4.....	114
Tabelle 5-39: Vergleich der Neigungen von Wöhler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_ZL_4 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	114
Tabelle 5-40: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_ZL_4.....	116
Tabelle 5-41: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Blockprogrammversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_TZN_4.....	119
Tabelle 5-42: Vergleich der Neigungen von Wöhler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_TZN_4 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	119
Tabelle 5-43: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_TZN_4.....	121

Tabelle 5-44: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Blockprogrammversuchen an HV-Garnituren	124
Tabelle 5-45: Ausgewählte Probenbrüche der Versuchsreihe VR_TZN_3	125
Tabelle 5-46: Ausgewählte Probenbrüche der Versuchsreihe VR_TZN_4	126
Tabelle 5-47: Stufenhäufigkeiten der Teilfolge A_R.....	129
Tabelle 5-48: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Zufallslastenversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_PG_5.....	132
Tabelle 5-49: Vergleich der Neigungen von Wöhler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_PG_5 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit P_A = 50%	132
Tabelle 5-50: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_PG_5.....	133
Tabelle 5-51: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Zufallslastenversuchen im Vergleich	136
Tabelle 5-52: Vergleich der Neigungen von Wöhler und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_ZL_5 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit P_A = 50%	136
Tabelle 5-53: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_ZL_5	137
Tabelle 5-54: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Zufallslastenversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_TZN_5.....	140
Tabelle 5-55: Vergleich der Neigungen von Wöhler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_TZN_5 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	140

Tabelle 5-56: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_TZN_5.....	141
Tabelle 5-57: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Zufallslastenversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_PG_6.....	144
Tabelle 5-58: Vergleich der Neigungen von Wöhler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_PG_6 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	144
Tabelle 5-59: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_PG_6.....	145
Tabelle 5-60: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Zufallslastenversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_ZL_6.....	148
Tabelle 5-61: Vergleich der Neigungen von Wöhler- und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_ZL_6 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	148
Tabelle 5-62: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_ZL_6.....	149
Tabelle 5-63: Erreichte Lebensdauerwerte aus den Wöhler- und Zufallslastenversuchen im Vergleich für die Versuchsreihe VR_TZN_6.....	152
Tabelle 5-64: Vergleich der Neigungen von Wöhlerlinie und Gaßnerlinie für die Versuchsreihe VR_TZN_6 für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	152

Tabelle 5-65: Vergleich der tatsächlichen Schadenssummen in Abhängigkeit der verwendeten Modifikation der Miner-Regel zur Bestimmung der theoretischen Lebensdauer für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$ für die Versuchsreihe VR_TZN_6.....	153
Tabelle 5-66: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Zufallslastenversuchen an HV-Garnituren	155
Tabelle 5-67: Ausgewählte Probenbrüche der Versuchsreihe VR_ZL_5	156
Tabelle 5-68: Ausgewählte Probenbrüche der Versuchsreihe VR_ZL_6	157
Tabelle 6-1: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse für die unterschiedlichen Beschichtungsvarianten bei einer Mittelspannung von 70% der Mindeststreckgrenze	161
Tabelle 6-2: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse für die unterschiedlichen Beschichtungsvarianten bei einer Mittelspannung von 90% der realen Bauteil-streckgrenzen.....	162
Tabelle 6-3: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse aus den Wöhlerversuchen für eine 70%-ige Mindest- und 90%-ige reale Bauteilstreckgrenzenausnutzung	163
Tabelle 6-4: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Blockprogrammversuchen für eine 70- und 90%-ige Streckgrenzenausnutzung	177
Tabelle 6-5: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Zufallslastenversuchen für eine 70- und 90%-ige Streckgrenzenausnutzung	177
Tabelle 6-6: Vergleich der Neigungen von Wöhlerlinie und Gaßnerlinie in Abhängigkeit der Beschichtung für eine Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 50\%$	178
Tabelle 7-1: Empfohlene Modifikation der Miner-Regel mit den entsprechenden Gleichungen für die Gaßnerlinie ober- und unterhalb der Dauerfestigkeit	201
Tabelle 8-1: Ermittelte Lebensdauer im Überblick unter Berücksichtigung der Beschichtungsvarianten für den kleinsten geprüften Kollektivhöchstwert.....	208

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	Querschnitt
A_{d_3}	Kernquerschnitt
A_i	Querschnitt der Fläche i
A_N	Nennquerschnitt
A_S	Spannungsquerschnitt
a_{lin}	Koeffizient zur Linearisierung im Zeitfestigkeitsbereich bei der $\arcsin\sqrt{P}$ -Transformation
a_{Ueber}	Koeffizient zur Berechnung des Übergangsbereiches mithilfe der $\arcsin\sqrt{P}$ -Transformation
a_{Zeit}	Koeffizient zur Berechnung des Zeitfestigkeitsbereiches mithilfe der $\arcsin\sqrt{P}$ -Transformation
b	Hilfsmaß
b_{lin}	Koeffizient zur Linearisierung im Zeitfestigkeitsbereich bei der $\arcsin\sqrt{P}$ -Transformation
b_{Ueber}	Koeffizient zur Berechnung des Übergangsbereiches mithilfe der $\arcsin\sqrt{P}$ -Transformation
b_{Zeit}	Koeffizient zur Berechnung des Zeitfestigkeitsbereiches mithilfe der $\arcsin\sqrt{P}$ -Transformation
C	Parameter C nach Hück
d	Nenndurchmesser der Schraube
d_2	Flankendurchmesser des Schraubengewindes
d_3	Kerndurchmesser des Schraubengewindes
d_a	Innendurchmesser der ebenen Kopfauflagefläche
d_s	Durchmesser des Spannungsquerschnittes A_S
d_s	Schaftdurchmesser
d_W	Auflageaußendurchmesser
D	Nenndurchmesser des Muttergewindes
D_1	Kerndurchmesser des Muttergewindes

D_2	Flankendurchmesser des Muttergewindes
D_a	Innendurchmesser der ebenen Mutterauflagefläche
e	Eckmaß
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
ΔF_a	Stufenbreite der Kraft im Treppenstufenverfahren
F_A	Axialkraft
$F_{0,2}$	Streckgrenzkraft
F_m	Mittelkraft
F_M	Montagevorspannkraft
F_{max}	Bruchkraft
F_{SA}	Axiale Schraubenzusatzkraft
$F_{SA,max}$	Maximale axiale Schraubenzusatzkraft
F_{Ao}	Obere axiale Schraubenzusatzkraft
F_{Au}	Untere axiale Schraubenzusatzkraft
f	Frequenz
G	Grenzabmessung
$\overline{G_\sigma}$	Spannungsgradient
H	Häufigkeit
\bar{H}	Kollektivumfang
h	Höhe
I	Unregelmäßigkeitsfaktor
i	laufende Nummer
i	Stufe
j	Anzahl der Stufen im Kollektiv
k	Kopfhöhe
k	Neigung der Wöhlerlinie
\bar{k}	Neigung der Gaßnerlinie

$\overline{k_B}$	Neigung der Gaßnerlinie aus dem Blockprogrammversuch
$\overline{k_Z}$	Neigung der Gaßnerlinie aus dem Zufallslastenversuch
k^*	Neigung der modifizierten Lebensdauerlinie nach LIU und ZENNER
K_t	Formzahl
l	Nennlänge
Δl	Längendifferenz
l_G	Abstand des letzten vollen Gewindeganges von der Auflagefläche
l_S	Schaftlänge
M	Mittelspannungsempfindlichkeit
m	Mutternhöhe
m	Neigung der Rissfortschrittswöhlerlinie
N	Schwingspielzahl (Wöhlerlinie)
N_{50}	Mit einer 50%-igen Ausfallwahrscheinlichkeit ertragbare Schwingspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich (Wöhlerlinie)
N_i	ertragbare Schwingspielzahl
\overline{N}	Schwingspielzahl (Lebensdauerlinie)
\overline{N}_{50}	Mit einer 50%-igen Ausfallwahrscheinlichkeit ertragbare Schwingspielzahl im Zeitfestigkeitsbereich (Gaßnerlinie)
N_B	Bruchschwingspielzahl der Wöhlerlinie
\overline{N}_B	Bruchschwingspielzahl der Lebensdauerlinie
N_G	Grenzschwingspielzahl
N_k	Knickschwingspielzahl
N_D	Knickschwingspielzahl
N_Z	Schwingspielzahl bei Belastung im Zeitfestigkeitsbereich
\overline{N}_{exper}	experimentelle Bruchschwingspielzahl der Gaßnerlinie
\overline{N}_{rech}	rechnerische Bruchschwingspielzahl der Gaßnerlinie
n	Gesamtzahl der Proben je Stufe ($arcsin\sqrt{P}$ -Transformation)
n_i	Anzahl der Schwingspiele pro Stufe
P	Gewindesteigung

P	Wahrscheinlichkeit
P_A	Ausfallwahrscheinlichkeit
P_{Ueber}	Ausfallwahrscheinlichkeit im Übergangsbereich
P_{Zeit}	Ausfallwahrscheinlichkeit im Zeitfestigkeitsgebiet
P_{SWT}	Schädigungsparameter nach Smith, Watson und Topper
P_I	Schädigungsparameter nach Vormwald
P_e	Schädigungsparameter nach Werner
R	Streubreite
R	Spannungsverhältnis
\bar{R}	Spannungsverhältnis im Amplitudenkollektiv
R_m	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	Streckgrenze
$R_{m,min}$	Mindestzugfestigkeit
$R_{m,nom}$	Nennzugfestigkeit
$R_{p0,2,min}$	0,2%-Mindestdehngrenze
$R_{p0,2,nom}$	0,2%-Nenndehngrenze
r	Anzahl der Probenbrüche ($\arcsin\sqrt{P}$ -Transformation)
S	Schadenssumme
s	Schlüsselweite
s	Standardabweichung
S_m	Mittelspannung
S_D	dauerfest ertragbare Spannungsamplitude
ΔS_i	Teilschädigung
S_{tat}	Tatsächliche Schädigung
t	Zeit
T_S	Prozesstemperatur
α	Flankenwinkel
α_k	Formzahl

ε	Dehnung
ε_a	Dehnungsamplitude
δ_p	Elastische Nachgiebigkeit der verspannten Teile
δ_s	Elastische Nachgiebigkeit der Schraube
π	Kreiszahl
σ	Spannung
$\Delta\sigma$	Stufenbreite der Spannung im Treppenstufenverfahren
σ_a	Spannungsamplitude
$\bar{\sigma}_a$	Kollektivhöchstwert
σ_{ASV}	Spannungsamplitude der Dauerfestigkeit schlussvergüteter Schrauben (VDI 2230)
σ_{AZSV}	Spannungsamplitude der Zeitfestigkeit schlussvergüteter Schrauben (VDI 2230)
σ_{aD}	Spannungsamplitude der Dauerfestigkeit
σ_m	Mittelspannung
$\bar{\sigma}_m$	Mittelspannung im Amplitudenkollektiv
σ_N	Nennspannung
σ_{max}	maximale Kerbspannung
σ_{nK}	Nennspannung bei gekerbtem Bauteil
σ_{a10}	mit 10%-iger Ausfallwahrscheinlichkeit belegte Spannungsamplitude
σ_{a50}	mit 50%-iger Ausfallwahrscheinlichkeit belegte Spannungsamplitude
σ_{a90}	mit 90%-iger Ausfallwahrscheinlichkeit belegte Spannungsamplitude