

Michael Köhler
Sven Jenne
Kurt Pötter
Harald Zenner

Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit

 Springer

Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit

Michael Köhler • Sven Jenne • Kurt Pötter
Harald Zenner

Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit

 Springer

Dipl.-Ing. Michael Köhler
Haldenweg 14
71409 Schweikheim
Deutschland

Dr.-Ing. Kurt Pötter
Georgenstrasse 130
80798 München
Deutschland

Dr.-Ing. Sven Jenne
Sure Wisch 10
30625 Hannover
Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Harald Zenner
Narzissenhang 1
01328 Dresden
Deutschland

ISBN 978-3-642-13163-9 e-ISBN 978-3-642-13164-6
DOI 10.1007/978-3-642-13164-6
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften..

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Der Festigkeitsnachweis für Bauteile stellt einen Vergleich zwischen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit dar. Die Beanspruchbarkeit des Bauteils muss mit einem Sicherheitsabstand größer sein als die im Betrieb auftretende Beanspruchung. Beim Betriebsfestigkeitsnachweis, also bei schwingender Beanspruchung mit in der Regel veränderlichen Amplituden, können für den Vergleich Beanspruchung/Beanspruchbarkeit keine einfachen Kennwerte, z. B. statische Festigkeitskennwerte, verwendet werden, vielmehr sind Kennfunktionen zur Beschreibung der Beanspruchung und Beanspruchbarkeit erforderlich. Für die Beanspruchung ist das eine Häufigkeitsverteilung der Amplituden, d. h. ein Beanspruchungskollektiv oder eine Beanspruchungsmatrix. Für die Beanspruchbarkeit ist das zum Beispiel eine Bauteilwöhlerlinie. Grundsätzlich kann der Vergleich mit Lasten, Momenten, Nennspannungen, örtlichen Spannungen, örtlichen Dehnungen oder auf Basis von Bruchmechanikkennwerten vorgenommen werden.

Das vorliegende Buch befasst sich mit der Beanspruchung von Bauteilen, Strukturen und Systemen. Die für den Festigkeitsnachweis erforderliche Lastannahme ist von gleicher Wichtigkeit wie die Festlegung der Beanspruchbarkeit. Viele Schadensfälle in der Praxis sind auf eine fehlerbehaftete Lastannahme zurückzuführen. Ohne eine zuverlässige Lastannahme ist eine betriebsfeste Bemessung nicht möglich. Diese ist aber eine ganz wesentliche Voraussetzung für konstruktiven Leichtbau. Im vorliegenden Buch werden zum einen die Zählverfahren behandelt und bewertet, mit denen gemessene Beanspruchungszeitfunktionen in Häufigkeitsverteilungen (Kollektive, Matrizen) transformiert werden können. Die Rainflow-Zählung steht dabei im Mittelpunkt. Zum anderen wird der Weg zu der für den Festigkeitsnachweis notwendigen Lastannahme beschrieben.

Das vorliegende Buch wendet sich an Ingenieure in der Industrie und in der Forschung, die sich mit der Lastannahme zur Bemessung schwingbeanspruchter Bauteile befassen oder – allgemeiner gesagt – mit dem, was heute als Structural Integrity bezeichnet wird. Speziell angesprochen sind Konstrukteure und Berechnungsingenieure sowie Mess- und Versuchsingenieure. Es war ein Anliegen der Verfasser, stets praxisrelevante Fragen zu berücksichtigen, neuere und neue Entwicklungen aufzuzeigen und Empfehlungen für die praktische Anwendung zu geben.

Betreffs der Zählverfahren kann auf das FVA-Merkblatt 0/14, „Zählverfahren zur Bildung von Kollektiven aus Zeitfunktionen – Vergleich der verschiedenen Verfahren und Beispiele“, das 1988 im Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, TU Clausthal, erstellt wurde, hingewiesen werden. Dieses entstand im Auftrag der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt, und wird bis heute an die Mitgliedsfirmen der FVA verteilt. Herrn Dr. W. Fischer, dem langjährigen Obmann des FVA-Arbeitskreises „Lastkollektive“ sei an dieser Stelle für seine nicht ermüdende Unterstützung zu diesem Thema, auch bei dem vorliegenden Buch, gedankt.

Dank gesagt für die Unterstützung beim Zustandekommen dieses Buches sei auch dem Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der TU Clausthal, seinem Leiter Prof. Dr. A. Esderts, Herrn Dr. R. Masendorf, Herrn Dipl.-Math. K. Hinkelmann, Herrn Dipl.-Ing. C. Müller und dem früheren Mitarbeiter Herrn Dr. H. Mauch.

Für Fragen und Hinweise sind die Autoren dankbar. Die E-Mail-Adresse hierfür lautet „zaehlverfahren-lastannahme@gmx.de“

Die Autoren

Inhalt

1 Einführung	1
Literatur	6
Teil I Zählverfahren	
2 Beschreibung der Zählverfahren	9
2.1 Grundlagen	9
2.1.1 Klassen	9
2.1.2 Rückstellbreite und Klassenbreite	9
2.2 Normen	12
2.3 Einparametrische Zählverfahren	12
2.3.1 Spitzenzählung SZ	12
2.3.2 Klassengrenzenüberschreitungszählung KGÜZ	13
2.3.3 Bereichszählung BZ	16
2.3.4 Bereichspaarzählung BPZ	17
2.4 Zweiparametrische Zählverfahren	18
2.4.1 Bereichs-Mittelwert-Zählung BMZ	19
2.4.2 Von-Bis-Zählung VBZ	20
2.4.3 Bereichspaar-Mittelwert-Zählung BPMZ	21
2.4.4 Rainflow-Zählung RFZ	23
Literatur	28
3 Ableitung von Kollektiven aus Matrizen	31
3.1 Übergangsmatrix	31
3.2 Rainflowmatrix	36
Literatur	41
4 Vergleich der Zählverfahren für Beispiel-BZFn	43
4.1 Untersuchte Beanspruchungszeitfunktionen	43
4.2 Randombeanspruchung mit einem Unregelmäßigkeitsfaktor $I=0,99$	43
4.3 Randombeanspruchung mit einem Unregelmäßigkeitsfaktor $I=0,7$...	43

4.4 Gedämpfte Schwingbeanspruchung 44

4.5 Überlagerte Sinus-Sinusbeanspruchung 44

Literatur 49

5 Mehrachsige Belastungen und Beanspruchungen 51

5.1 Begriffsklärung 51

5.2 Messtechnische Erfassung 52

5.2.1 Kalibrierte DMS Messstellen 52

5.2.2 x-y-DMS bzw. Mehrfach-DMS 52

5.3 Klassierung mehrachsiger Belastungen 53

5.4 Klassierung mehrachsiger Spannungszustände 53

Literatur 55

6 Verweildauer- und Momentanwertzählung 57

6.1 Einparametrisch 57

6.1.1 Verweildauerzählung VZ 57

6.1.2 Momentanwertzählung MWZ 58

6.1.3 Bezogene Momentanwertzählung BMWZ 60

6.2 Zweiparametrisch 61

6.2.1 Zweiparametrische Verweildauerzählung ZVZ 61

6.2.2 Zweiparametrische Momentanwertzählung ZMWZ 62

6.2.3 Bezogene zweiparametrische Momentanwertzählung BZMWZ 63

Literatur 65

7 Anwendung der Zählverfahren 67

7.1 Kriterien zur Auswahl eines Zählverfahrens 67

7.2 Empfehlungen 69

7.2.1 Graphische Darstellung 69

7.2.2 Praktische Erfahrungen 69

Literatur 70

Teil II Lastannahme

8 Charakteristische Betriebsbeanspruchungen 77

8.1 Zeitbereich 77

8.1.1 Beanspruchungszeitfunktionen 77

8.1.2 Beanspruchungsursachen 82

8.1.3 Deterministische und stochastische Beanspruchungszeitfunktionen 86

8.1.4 Sonderereignisse und Missbrauch 90

8.2 Häufigkeitsbereich 92

8.2.1 Beschreibung von Beanspruchungskollektiven 93

8.2.2 Extrapolation 99

8.2.3 Standardisierte Lastabläufe und Kollektive 105

Literatur 108

- 9 Rechnerische Lebensdauerabschätzung** 111
 - 9.1 Palmgren-Miner-Regel 112
 - 9.1.1 Berücksichtigung von Mittelspannung S_m
und Spannungsverhältnis R 114
 - 9.2 Modifikationen der Palmgren-Miner-Regel 115
 - 9.3 Vergleich Rechnung und Versuch 117
 - 9.3.1 Ergebnisse 122
 - 9.4 Relative Palmgren-Miner-Regel 123
 - Literatur 124

- 10 Bemessungskollektive** 127
 - 10.1 Ermittlung repräsentativer Kollektive 128
 - 10.1.1 Festlegung der relevanten Messfrequenz 128
 - 10.1.2 Hinweise zur Bildung von Messkollektiven 129
 - 10.1.3 Bestimmung der erforderlichen Messdauer 131
 - 10.1.4 Empfehlungen für die Auswertung umfangreicher
Betriebsmessungen 132
 - 10.2 Erstellung von Bemessungskollektiven 133
 - 10.3 Unterschiedliche Vorgehensweisen 134
 - Literatur 135

- 11 Sicherheitsaspekte** 137
 - 11.1 Bauteilbemessung 137
 - 11.2 Sicherheitskonzept 142
 - 11.3 Zuverlässigkeitskonzept 143
 - 11.4 Streuung der Beanspruchbarkeit 149
 - 11.5 Streuung der Beanspruchung 153
 - 11.6 Sicherheit und Technik 158
 - 11.6.1 Berechnung und/oder Versuch 158
 - 11.6.2 Schadensfälle 159
 - 11.6.3 Vergleich der Konzepte 162
 - 11.6.4 Unterschiede in den Anwendungsbereichen 168
 - 11.6.5 Sicherheitsrelevante Maßnahmen 169
 - Literatur 173

- 12 Lastannahme in verschiedenen Sachgebieten** 177
 - 12.1 Lastannahme im Regelwerk 177
 - 12.1.1 Beispiel Krane 178
 - 12.1.2 Beispiel Schienenfahrzeuge 178
 - 12.1.3 Beispiel Fahrräder 182
 - 12.2 Beispiel Automobilherstellung 184
 - 12.2.1 Betriebslasten 185
 - 12.2.2 Sonderereignisse 190
 - Literatur 192

13	Zusätzliche Literaturhinweise zu Lastannahmen	
	in verschiedenen Sachgebieten	195
13.1	Allgemeiner Maschinenbau	195
13.2	Anlagentechnik	196
13.3	Windkraftanlagen	197
13.4	Kraftfahrzeuge	197
13.5	Schienen-Fahrzeuge	200
13.6	Flugzeugbau und Raumfahrt	201
13.7	Schiffbau und Offshore-Konstruktionen	202
13.8	Baumaschinen und Landmaschinen	202
13.9	Sportgeräte	202
13.10	Zuverlässigkeit	203
13.11	Bücher mit dem Schwerpunkt Lastannahme	203
13.12	Tagungen und Konferenzen	204
	Sachverzeichnis	207

Abkürzungsverzeichnis

AGARD	Advisory Group for Aerospace Research & Development
ASTM	American Society for Testing and Materials
BG	Berechnungsgruppe
BMZ	Bereichs-Mittelwert-Zählung
BPMZ	Bereichspaar-Mittelwert-Zählung
BPZ	Bereichspaarzählung
BZ	Bereichszählung
BZF	Beanspruchungszeitfunktion
BZFn	Beanspruchungszeitfunktionen
DMS	Dehnungsmessstreifen
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik
GV	Geradlinienverteilung
HCF	High Cycle Fatigue
KGÜZ	Klassengrenzenüberschreitungszählung
LEF	Lasteingangsfunktion
MWZ	Momentanwertzählung
NV	Normalverteilung
RF	Rainflow
RFZ	Rainflow-Zählung
SZ	Spitzenzählung
TGL	Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen, DDR 1955–1990
UHCF	Ultra High Cycle Fatigue
UIC	Internationaler Eisenbahnverband
ÜM	Übergangsmatrix
VZ	Verweildauerzählung

Formelzeichen

a, b	Klassengrenzen
a_p, b_i	Klassen bei zweiparametrischer Verweildauer- und Momentanwertzählung
a_i	Gewichtungsfaktor
a_y	Fahrzeugbeschleunigung
A_i	Arbeitsprozesse
C	Crestfaktor
d_i	Schädigung je Schwingenspiel
D, D_i	Schadenssummen
D_B	Beanspruchungskennzahl
D_{B50}	Mittelwert Schadenssumme (Beanspruchung)
D_{calc}	berechnete Schadenssumme
D_{eff}	effektive Schadenssumme
D_{F50}	Mittelwert Schadenssumme (Beanspruchbarkeit)
D_{ti}	Verweildauer des Signals in der Klasse i
e	Extrapolationsfaktor
E	Erhöhungsfaktor bei Extrapolation
F	Last
F_O	Oberlast
F_x, F_y, F_z	Kraft in Längs-, Seiten und Vertikalrichtung
$F_{z,stat}$	statische Radaufstandskraft
$F_{z,Brems}$	dynamische Achslast beim Bremsen
$F_{z,Kurve}$	dynamische Achslast bei Kurvenfahrt
$F_{z,Widerstand}$	Widerstandskraft
h_i	Stufenhäufigkeit der Stufe i
H	Summenhäufigkeit der Schwingenspiele
$H(x)$	Anzahl der Überschreitungen der Klasse x
H_{Bi}	Teil-Kollektive
H_M	Summenhäufigkeit für Messdauer
H_N	Summenhäufigkeit für Nutzungsdauer
H_0	Kollektivumfang
i	Ordnungszahl, Klassenzahl, Horizonte

I	Unregelmäßigkeitsfaktor (Irregularity Factor)
j	Ordnungszahl
$\hat{J}_{C,n}$	Sicherheitsfaktor für eine Vertrauenswahrscheinlichkeit
\hat{J}_S	Sicherheitszahl
\hat{J}_S	spannungsbezogene Sicherheitszahl
\hat{J}_N	schwingspielzahlbezogene Sicherheitszahl
k	Neigung der Wöhlerlinie
k	Stichprobenumfang
k*	Neigung der abgeknickten Wöhlerlinie in den Modifikationen
K_t	Formzahl
m	Mittelwert von Differenzwerten z
m	Neigung der Rissfortschrittswöhlerlinie
M_1, M_2	Biegemoment Radsatzwelle
M_x, M_y, M_z	Momente um die Achsen in Längs-, Seiten und Vertikalrichtung
n	Anzahl von Proben, Versuchsreihen oder Abschnitten
n_{ges}	Anzahl der Belastungsabschnitte während der Gesamtnutzungsdauer
n_S	Anzahl der Standardabweichungen im Data-Pooling
n_0	Anzahl der einsinnigen Nulldurchgänge
n_1	Anzahl der Maxima
N	Anzahl der Schwingspiele
N_D	Eckschwingspielzahl
N_{50}	Mittelwert der Schwingspiele
\hat{N}	Schwingspielzahl bei variabler Amplitude
\hat{N}_{calc}	rechnerisch ermittelte Schwingspielzahl
\hat{N}_{exp}	experimentell ermittelte Schwingspielzahl
p	Wert/Maß für Kollektivvölligkeit
p	Verteilungsdichte
P	Wahrscheinlichkeit
P_a	Ausfallwahrscheinlichkeit Beanspruchbarkeit
P_e	Eintretenswahrscheinlichkeit Beanspruchung
P_u	Überlebenswahrscheinlichkeit ($1 - P_a$)
P_A	Gesamtausfallwahrscheinlichkeit Zuverlässigkeitskonzept
Q1, Q2	Vertikalkräfte (Bahn)
R	Spannungsverhältnis
s	Standardabweichung
s_B	Standardabweichung der Beanspruchung
s_{BG}	Standardabweichung der Berechnungsgruppe
s_{DB}	Standardabweichung der Schadenssumme (Beanspruchung)
s_{DF}	Standardabweichung der Schadenssumme (Beanspruchbarkeit)
s_F	Standardabweichung der Beanspruchbarkeit
$s_{50,N}$	Mittelwert der Standardabweichung im Data-Pooling in N-Richtung
$s_{s,N}$	Standardabweichung der Standardabweichungen im Data-Pooling in N-Richtung

$s_{50,S}$	Mittelwert der Standardabweichung im Data-Pooling in S-Richtung
$s_{s,S}$	Standardabweichung der Standardabweichungen im Data-Pooling in S-Richtung
$s_{90,S}$	90% $P_{\bar{u}}$ -Wert der Standardabweichungen in S-Richtung
S	Sicherheitsfaktor
S	Nennspannung
S_a	Spannungsamplitude
S_{aB}	Nennspannungsamplitude Beanspruchung
S_{aB50}	Mittelwert der dauerhaft zu ertragenden Schwingamplitude
S_{aF}	dauertfest ertragbare Schwingamplitude
S_{aF50}	Mittelwert der dauerhaft ertragbaren Schwingamplitude
$S_{ai(hi)}$	Nennspannungsamplitude der Stufe i eines Kollektives
$S_{ai(Ni)}$	Wöhlerlinie Nennspannung
S_D	Dauerfestigkeit
S_m	Mittelspannung
$S(t)$	Beanspruchungszeitfunktion Nennspannung
\hat{S}_a	Kollektivhöchstwert Nennspannung
\hat{S}_{aM}	Kollektivhöchstwert Nennspannung für Messdauer
\hat{S}_{aN}	Kollektivhöchstwert Nennspannung für Nutzungsdauer
t	Zeit
t_i	Verweildauer pro Klasse
t_M	Messdauer
t_N	Gesamtnutzungsdauer
T	Zeit, Zeitdauer
T	Streuspanne
T, T_a	Antriebs-, Torsionsmoment, Amplitude
T_D	Streuspanne der Schadenssumme
$T_{D,BG}$	Streuspanne der Berechnungsgruppe
ΔT_i	Verweildauer in einer Klasse
u	Quantil der Ausfallwahrscheinlichkeit
u_0	bezogene Sicherheitsspanne
v	Völligkeitsmaß für Kollektive
v	Streuungsverhältnis
x	Ordnungszahl
x_{eff}	Effektivwert
x_{max}	Maximalwert von $x(t)$
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert
\bar{x}^2	quadratischer Mittelwert
$Y1, Y2$	Lateralkräfte (Bahn)
z	Differenzwert
ϵ_{DMS}	Dehnung eines DMS
μ	Reibwert
v	Formparameter
σ	Standardabweichung Grundgesamtheit
σ^2	Varianz

Kapitel 1

Einführung

Das vorliegende Fachbuch befasst sich mit der messtechnischen Ermittlung und Verarbeitung von Beanspruchungszeitsignalen und der Erstellung einer für die betriebsfeste Bemessung von Bauteilen und Konstruktionen notwendigen Lastannahme.

Die Messung der Betriebsbeanspruchungen unter realen Betriebsbedingungen ist die beste Voraussetzung für eine zuverlässige Lastannahme. Zunehmend erfolgt heute eine Lastannahme auch durch rechnerische Simulation, wobei eine Maschinenanlage oder ein Fahrzeug als schwingungsfähiges Feder-Masse-System betrachtet wird und die Beanspruchung an den versagenskritischen Stellen einer Konstruktion aus der Dynamik des Gesamtsystems abgeleitet wird. Diese Simulation ist geeignet zur Analyse des grundsätzlichen Verhaltens eines Schwingungssystems und kann konstruktive Wege zur Reduktion von Betriebsbeanspruchungen aufzeigen und damit Potenzial für Leichtbau. Die Simulation kann zum Beispiel auch im Einzelmaschinenbau angewendet werden, wenn bei einer Neukonstruktion keine ausreichenden Betriebserfahrungen vorliegen, oder zur Ermittlung von Überlasten, die bei Sonderereignissen wie havarieähnlichen Ereignissen auftreten können, die sich aber in der Regel einer Messung entziehen. Wichtig ist es, die Grenzen der Simulation richtig einzuschätzen. Dazu sind auf großer Breite Erfahrungen durch Vergleich von Simulation und Messung notwendig. Ein geringer Fehler in der Lastannahme hat bereits einen großen Einfluss auf die ertragbaren Schwingspiele einer Konstruktion. Wie die Entwicklungen in den letzten Jahren auf diesem Gebiet zeigen, gelingt es immer besser, die durch spezifische Betriebszustände erzeugten Beanspruchungen durch Simulation anzunähern, und dieser Trend wird sich fortsetzen. Genannt seien hier der Fahrzeugbau, das Rad-Schiene-System und Windkraftanlagen.

Für die Belange der Betriebsfestigkeit, d. h. im Hinblick auf die Dimensionierung von Bauteilen und Strukturen für eine spezifische Lebensdauer, interessieren in erster Linie die Größe der Beanspruchungsamplituden und deren Häufigkeit. Der Frequenzinhalt der Beanspruchungszeitfunktion BZF, die Reihenfolge des Auftretens der Ereignisse und die Schwingungsform werden dabei im Allgemeinen vernachlässigt. Damit können die in der BZF enthaltenen Informationen reduziert werden, z. B. auf die Größe und Häufigkeit der auftretenden Maxima und Minima. Für diese Datenreduktion stehen verschiedene Zählverfahren, auch Klassierverfahren

ren genannt, zur Verfügung. Bei der Anwendung von Zählverfahren ist deshalb zu prüfen, ob im spezifischen Anwendungsfall die Voraussetzungen für die Vernachlässigungen zulässig sind. So kann die Vernachlässigung des Frequenzinhaltes nicht zulässig sein, wenn ein zeitabhängiges Werkstoff- und Bauteilverhalten auftritt, wie zum Beispiel bei hohen Temperaturen im Kriechbereich, bei Ermüdung in korrosiven Medien oder bei Elastomeren bereits bei normalen Umgebungsbedingungen. Ein Reihenfolgeeinfluss der Belastung auf die ertragbare Lebensdauer lässt sich im Labor als signifikant nachweisen, zum Beispiel im High-low- und Low-high-Zweistufenversuch oder beim Aufbringen von Überlasten zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Dagegen aber steht die Jahrzehnte lange Erfahrung, dass bei Auftreten von sehr vielen Schwingspielen und bei einer starken Durchmischung kleiner und großer Amplituden die Reihenfolge der Belastung keinen Einfluss ausübt. Für mehrachsige, nichtproportionale Beanspruchung ist bekannt, dass die Schwingungsform (Dreieck, Sinus, Trapez) die Lebensdauer und die Höhe der Dauerfestigkeit beeinflusst, [Liu 93].

Die erste Anwendung von Zählverfahren in Deutschland liegt kurz vor der Einführung des Betriebsfestigkeitsnachweises durch E. Gaßner, [Gaßn 41]. So stammen Häufigkeitsverteilungen von Beanspruchungen aus Messungen an Landmaschinen aus dem Jahr 1932 und 1936 [Klot 32], [Klot 36]. Seither sind eine Reihe von Zählverfahren für die Belange der Betriebsfestigkeit veröffentlicht worden. Die Zählverfahren haben sich historisch entwickelt, insbesondere im Flugzeugbau, wobei die Entwicklung der Messtechnik und der Datenverarbeitung einen starken Einfluss ausgeübt haben. Heute stehen leistungsfähige Rechner und Speichermedien zur Verfügung. War in der Vergangenheit durch die begrenzten Ressourcen eine Notwendigkeit zur Online-Klassierung gegeben, können heute große Datenmengen zum Teil über Stunden als transiente Signale aufgezeichnet werden. Die anschließende Datenreduktion durch Zählverfahren ist damit heute, neben anderen Verfahren der allgemeinen Signalanalyse, hauptsächlich ein Instrument zur Ermittlung von Kennfunktionen für die Lebensdauerabschätzung.

Ein wichtiger Kennwert zum Vergleich von Messungen ist die Schadenssumme. Sie ergibt sich durch eine Schadensakkumulationsrechnung gegen eine reale oder fiktive Wöhlerlinie. Eine Wöhlerlinie ist die Darstellung der ertragbaren Beanspruchungsamplitude über der Schwingspielzahl, vergl. Kap. 9. Wird eine fiktive Wöhlerlinie verwendet, liefert die Schadenssumme keine Aussage bezüglich des tatsächlichen Versagens des Bauteils, sondern dient ausschließlich der vergleichenden Analyse von Messdaten. Früher wurden in der Praxis mehrere Zählverfahren angewendet. Heute hat sich für die Lebensdauerberechnung und die Generierung von BZFn, z. B. zur Prüfstandssteuerung eines Betriebsfestigkeitsversuchs, die Rainflow-Zählung durchgesetzt. Sie ist auch das einzige Zählverfahren mit einem physikalischen Hintergrund. Für graphische Darstellungen von Beanspruchungen in Form von Kollektiven werden, wie in Kap. 8.2 gezeigt wird, zum Beispiel auch die einparametrische Bereichspaarzählung und die Klassengrenzenüberschreitungs-zählung verwendet, da Kollektive die spezifischen Merkmale bei einem Beanspruchungsvergleich deutlicher zeigen als Beanspruchungsmatrizen. Dies gilt zum Beispiel für folgende Anwendungen:

- Kontrolle von Messungen (Plausibilität z. B. im Hinblick auf die Extremwerte, den Mittelwert und die Häufigkeit)
- qualitativer und quantitativer Vergleich von Messungen zur Beurteilung unterschiedlicher Betriebszustände (Kollektiv-Form, Schadenssumme)
- rechnerische Lebensdauerabschätzung
- Trennung von Beanspruchungsursachen soweit möglich, z. B. durch die Bildung von Teilkollektiven
- Generierung von BZFn für die Durchführung von Betriebsfestigkeitsversuchen.

Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten, Ereignisse einer kontinuierlichen BZF zu zählen:

- die Messgröße erreicht einen Umkehrpunkt (Maximum, Minimum)
- die Messgröße überstreicht einen Bereich, d. h. sie geht von einem Minimum zum nächsten Maximum und umgekehrt
- die Messgröße schließt Hysteresen in positiver und negativer Richtung
- die Messgröße kreuzt oder überschreitet einen vorgegebenen Horizont in positiver oder negativer Richtung
- die Messgröße wird für äquidistante Zeitpunkte bestimmt
- die Messgröße wird zu Zeitpunkten bestimmt, die von einer anderen Größe, z. B. Drehzahl oder Drehwinkel vorgegeben werden.

Die kennzeichnenden Größen für die Beanspruchbarkeit sind die Amplitude und der Mittelwert eines Schwingspiels bzw. das Maximum und Minimum. Je nachdem, ob die Amplitude bzw. Klassengrenze allein gezählt wird oder das Wertepaar Amplitude und Mittelwert bzw. Maximum und Minimum, unterscheidet man ein- und zweiparametrische Zählverfahren.

Die Zählverfahren können das Kollektiv und damit das Ergebnis der rechnerischen Lebensdauerabschätzung stark beeinflussen. Je nach Art der BZF variieren die Ergebnisse der verschiedenen Zählverfahren unterschiedlich stark voneinander. Die Bewertung einer BZF ist dabei stark abhängig von Mittellaständerungen. Aus Sicht der Betriebsfestigkeit ist dem Zählverfahren der Vorzug zu geben, das die für die Lebensdauer maßgebende Schädigung am Besten erfasst. Nach heutigem Kenntnisstand ist das die Rainflow-Zählung, [Euli 94], [Euli 97], die sich international durchgesetzt hat.

In diesem Buch werden neben den klassischen Zählverfahren der Betriebsfestigkeit die ein- und zweiparametrische Verweildauer- bzw. die Momentanwertzählung behandelt. Bei diesen Zählverfahren wird nicht die Häufigkeit gezählt, mit der z. B. ein Maximum eine Klasse erreicht, sondern die Zeit bzw. die Verweildauer in dieser Klasse. Anwendung finden diese Zählverfahren häufig im Bereich von Getriebe- und Motorbauteilen. Gleiches gilt für die zweiparametrische Verweildauer- bzw. Momentanwertzählung. Neu ist der Vorschlag einer bezogenen Momentanwertzählung, die sowohl einparametrisch als auch zweiparametrisch verwendet wird. Als Erweiterung der Momentanwertzählung ist die Klassenhäufigkeit nicht abhängig von der Verweildauer sondern von einer weiteren Referenzgröße, z. B. der Dreh-

zahl. Sie eignet sich besonders für die Klassierung von BZFn an rotierenden Bauteilen.

Erläutert wird die Anwendung der Zählverfahren bei mehrachsigen Belastungen und Beanspruchungen. Für komplexe Beanspruchungen, z. B. mehrere Kraftkomponenten mit variablen Amplituden, mit Phasenverschiebung oder unterschiedlicher Frequenz, stößt man gegenwärtig an Grenzen. Hierfür geeignete Zählverfahren zu entwickeln, ist noch Gegenstand der Forschung.

Im Technischen Regelwerk für die betriebsfeste Auslegung von Bauteilen stellen Lastannahmen eine Ausnahme dar. Dies ist verständlich, da der Einsatz von Bauteilen sehr stark variieren kann. Wird zum Beispiel ein Getriebe einer spezifischen Leistung in einem Antriebsstrang eingebaut, so ist für die Lebensdauer der Zahnräder (Zahnflanke, Zahnfuß) die Dynamik des gesamten Systems entscheidend. Diese wieder hängt von An- und Abfahrvorgängen, vom Arbeitsprozess und vom Feder-Masse-System des Antriebsstranges und der vorhandenen Schwingungsdämpfung ab. Der Hersteller wird also im Normalfall eine Lastannahme treffen, die auf Betriebsmessungen basiert und die in der Regel auf Jahrzehnte langen Betriebserfahrungen beruht. Ausgehend von Betriebsmessungen sind bis hin zur Lastannahme verschiedene Schritte notwendig:

- Festlegung einer Gesamtnutzungsdauer
- Unterscheidung zwischen verschiedenen Betriebszuständen
- Gewichtung der Betriebszustände (Einsatzspiegel)
- Extrapolation der Teilkollektive
- Berücksichtigung von Überlasten aus Sonderereignissen
- Erstellung eines Gesamtkollektives bzw. einer entsprechenden Matrix

Da die Beanspruchungen und die Beanspruchbarkeit von Bauteilen streuen, ist sowohl für die Beanspruchung als auch für die Beanspruchbarkeit eine Teilsicherheit zu berücksichtigen. Für die Beanspruchung bedeutet das zum Beispiel eine Abschätzung, mit welchem Anteil der Schädigung die einzelnen Betriebszustände beteiligt sind. Ist dies bekannt, so muss abgeschätzt werden, welcher ungünstige realistische Einsatzspiegel zugrunde zu legen ist. Maßgebend für die zu verwendenden Teilsicherheiten ist letztlich das bei einem Versagensfall vorhandene Risiko.

Die betriebsfeste Auslegung hat in den letzten Jahrzehnten, ausgehend vom Flugzeugbau und Kraftfahrzeugbau, in nahezu allen technischen Bereichen eine zunehmende Anwendung gefunden. Genannt seien Anlagenbau, Maschinenbau bis hin zum Schwermaschinenbau, Kraftwerksbau, Schiffbau, Brückenbau und zu Windkraftanlagen, Schienenfahrzeugen, Off-Shore-Plattformen, Kranbau, Pipelines, Landmaschinen und Sportgeräten. Kritische Zonen sind Spannungskonzentrationen an Bauteilen und Strukturen insbesondere auch bei Maschinenelementen. Von besonderer Bedeutung sind Fügungen wie Schweißverbindungen. Eine dauerfeste Auslegung ist heute keinesfalls der Regelfall.

Basis für die betriebsfeste Auslegung ist die Annahme einer begrenzten Nutzungsdauer, was in Abb. 1.1 beispielhaft gezeigt ist. In Abb. 1.2 ist für Nennspannungen die dauerfeste Auslegung der betriebsfesten gegenüber gestellt. Dadurch, dass bei der betriebsfesten Auslegung Amplituden oberhalb der Dauerfestigkeit

Abb. 1.1 Beispiele für Nutzungsdauern

Beispiele für Nutzungsdauern

- Kraftwerk
30 Jahre
- Verkehrsflugzeug
70.000 Flüge
- Schienenfahrzeug
30 bis 40 Jahre
- Pkw
300.000 km



zugelassen werden, kann eine Bemessung der Bauteile mit geringeren Querschnitten vorgenommen werden als bei der dauerfesten Auslegung. Damit stellt die Vorgehensweise der Betriebsfestigkeit eine außerordentlich wirksame Maßnahme für Leichtbau dar.

In Kap. 13, „Zusätzliche Literaturhinweise zu Lastannahmen in verschiedenen Sachgebieten“ sind einige wichtige Fachbücher über Betriebsfestigkeit, in denen auch die Lastannahme einen Schwerpunkt darstellt, aufgeführt.

Die Auslegung von Bauteilen für eine begrenzte Nutzungsdauer und damit auch der konstruktive Leichtbau bedeuten kein erhöhtes Risiko. Die Aufgabe bei der betriebsfesten Auslegung besteht gerade darin, eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten. Dazu gehören die Entwicklung der geeigneten Konstruktion, die Werkstoffwahl und zum Beispiel das Fügeverfahren, ein rechnerischer und in der Regel auch experimenteller Festigkeitsnachweis, eine Überwachung des Fertigungsprozesses, die Qualitätssicherung der Produkte sowie in vielen Fällen die Überwa-

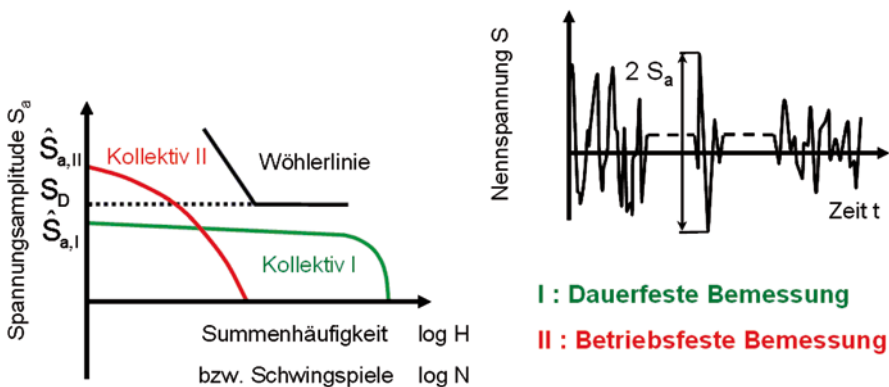


Abb. 1.2 Dauer- und betriebsfeste Bemessung von Bauteilen

chung im Betrieb. Die zuverlässige Lastannahme ist eine Grundvoraussetzung für eine ausreichende Sicherheit.

Literatur

- [Euli 94] Eulitz, K.G., Döcke, H., Kotte, K.H., Esderts, A., Zenner, H.: Verbesserung der Lebensdauerabschätzung durch systematische Aufarbeitung und Auswertung vorliegender Versuchsreihen. FKM Forschungsheft „Lebensdauervorhersage I“ Heft 189 (1994)
- [Euli 97] Eulitz, K.G., Döcke, H., Kotte, K.H., Liu, J., Zenner, H.: Verbesserung der Lebensdauerabschätzung durch systematische Aufarbeitung, Speicherung und Auswertung vorliegender Versuchsdaten. FKM-Bericht „Lebensdauervorhersage II“ Heft 227 (1997)
- [Gaßn 41] Gaßner, E.: Auswirkung betriebsähnlicher Belastungsfolgen auf die Festigkeit von Flugzeugbauteilen. Diss. TH Darmstadt 1941, s. auch Jahrbuch d. Deutschen Luftfahrtforschung, Bd. 1, S. 972–983 (1941)
- [Klot 32] Kloth, W., Stoppel, T.: Der Energiefluss im Zapfwellenbinder. Die Technik in der Landwirtschaft. **13**, S. 49–91 (1932)
- [Klot 36] Kloth, W., Stoppel, T.: Kräfte, Beanspruchungen und Sicherheiten in den Landmaschinen. VDI-Z, **80**, S. 85–92 (1936)
- [Liu 93] Liu, J., Zenner, H.: Berechnung der Dauerfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung. Teil 2, Z Mat-wiss u Werkstofftech. **24**, S. 296–303 (1993)

Teil I

Zählverfahren

Zählverfahren dienen in der Betriebsfestigkeit dazu, für beliebige BZFn die Häufigkeitsverteilung der Amplituden zu bestimmen. Die Häufigkeitsverteilung der Amplituden bzw. die Beanspruchungsmatrix ist für die Lebensdauer schwingend beanspruchter Bauteile eine entscheidende Größe. Diese Zählung stellt, verglichen mit der BZF, eine Datenreduktion dar, die für den Festigkeitsnachweis notwendig ist.

In Teil I werden die wichtigsten ein- und zweiparametrischen Zählverfahren im Detail beschrieben und im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit bewertet. Da sich für die meisten Betriebsmessungen die zweiparametrische Rainflow-Zählung RFZ heute weltweit durchgesetzt hat, eine grafische Darstellung von Kollektiven wegen der besseren Anschaulichkeit aber sinnvoll sein kann, wird aufgezeigt, wie aus Matrizen Kollektive abgeleitet werden können. Um die unterschiedlichen Ergebnisse, zu denen die einzelnen Zählverfahren führen, deutlich zu machen, werden die Matrizen und Kollektive für vier Beispiel-Beanspruchungszeitfunktionen miteinander verglichen. Der gegenwärtige Stand der Klassierung bei mehrachsigen Beanspruchungen und Belastungen und die dabei auftretenden Probleme werden im Einzelnen dargestellt.

Weiterhin werden die ein- und zweiparametrische Verweildauer- und Momentanwertzählung beschrieben, wobei auf spezifische Anwendungen hingewiesen wird.

Für die Auswahl von Zählverfahren stehen verschiedene Kriterien zur Verfügung. Für die Darstellung der Ergebnisse werden Empfehlungen gegeben. Mit einer Reihe von praktischen Beispielen wird darauf hingewiesen, dass die richtige Anwendung von Zählverfahren stets einer kritischen Überprüfung bedarf.

Kapitel 2

Beschreibung der Zählverfahren

Im Folgenden werden die wichtigsten Zählverfahren beschrieben und bewertet, die im Fachgebiet Betriebsfestigkeit verwendet werden. Empfehlungen zur Anwendung werden gegeben.

2.1 Grundlagen

Zur Erläuterung wird eine Beispiel-BZF verwendet, Abb. 2.1.

2.1.1 Klassen

Voraussetzung für eine Zählung ist die Unterteilung des Messbereichs in Klassen gleicher Größe. Die Klassen sind fortlaufend in Richtung positiver Messgröße zu nummerieren. Für die Beispielzählungen werden acht Klassen gleicher Größe gewählt, Abb. 2.2. Werte, die auf einer Klassengrenze liegen, werden in der Regel zur darüber liegenden Klasse gezählt.¹

Für die folgenden Beispiele wird die Nulllinie der Messgröße auf die 4. Klassengrenze, d. h. zwischen die Klassen 4 und 5, gelegt.

2.1.2 Rückstellbreite und Klassenbreite

Bei allen Zählverfahren werden Schwingungen, die innerhalb einer Klasse auftreten, nicht erkannt und damit automatisch unterdrückt. Würde eine solche Schwingung mit kleiner Amplitude jedoch jeweils die anliegende Klassengrenze über-

¹ Ergebnisse verschiedener Zählungen sind nur vergleichbar, wenn solche Vereinbarungen übereinstimmen.