Joachim Rösler, Harald Harders, Martin Bäker

Mechanisches Verhalten der Werkstoffe

**Joachim Rösler, Harald Harders,
Martin Bäker**

Mechanisches Verhalten der Werkstoffe

Mit 296 Abbildungen, 28 Tabellen und 31 Aufgaben

B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Prof. Dr. rer. nat. Joachim Rösler, geb. 1959, Studium der Werkstoffwissenschaften an der Universität Erlangen-Nürnberg und der Universität Stuttgart von 1979 bis 1985. Nach der Promotion am Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart und Post-Doctorate Fellowship an der University of California at Santa Barbara Industrietätigkeit von 1991 bis 1996 bei der Asea Brown Boveri AG, Schweiz, hier zuletzt Leiter des Materiallabors der ABB Kraftwerke AG, Schweiz. Seit 1996 Professor für Werkstoffe und Leiter des gleichnamigen Instituts der Technischen Universität Braunschweig. Forschungsschwerpunkte sind metallische Hochtemperaturwerkstoffe, das mechanische Verhalten von Werkstoffen und die Werkstoffentwicklung.

Dipl.-Ing. Harald Harders, geb. 1972, studierte von 1993 bis 1998 Maschinenbau an der Technischen Universität Braunschweig mit der Vertiefungsrichtung Mechanik und Werkstoffe. 1999 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugmechanik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Seit 1999 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe der Technischen Universität Braunschweig, Forschungen zum Ermüdungsverhalten von Metallschäumen.

Dr. rer. nat. Martin Bäker, geb. 1966, studierte von 1987 bis 1993 Physik an der Universität Hamburg. Nach der Promotion an der Universität Hamburg von 1995 bis 1996 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am II. Institut für theoretische Physik der Universität Hamburg. Seit 1996 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe der Technischen Universität Braunschweig, Arbeitsschwerpunkt ist die kontinuumsmechanische Simulation von Werkstoffprozessen.

Satz und Textgestaltung: Harald Harders

1. Auflage Juni 2003

Alle Rechte vorbehalten

© B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2003

Der B. G. Teubner Verlag ist ein Unternehmen der Fachverlagsgruppe BertelsmannSpringer.
www.teubner.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

ISBN 978-3-519-00438-7 ISBN 978-3-322-93100-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-322-93100-9

Vorwort

Nahezu jedes im Maschinenbau eingesetzte Bauteil unterliegt hohen mechanischen Belastungen. Eine eingehende Beschäftigung mit dieser Thematik ist deshalb für Studierende des Maschinenbaus und der Materialwissenschaften von grundsätzlicher Bedeutung. Dabei ist die Herangehensweise oftmals grundsätzlich unterschiedlich. Während sich der Ingenieur eher für Bemessungsregeln als für Vorgänge im Werkstoffinneren interessiert, stehen in der materialwissenschaftlichen Ausbildung oftmals die physikalischen Mechanismen im Vordergrund, die sich bei mechanischer Beanspruchung abspielen. Letztlich ist aber in der beruflichen Praxis beides wichtig. Ohne ein wirkliches Verständnis der Verformungsmechanismen im Werkstoff läuft man Gefahr, Bemessungsregeln unkritisch anzuwenden und dadurch »unerwartetes« Werkstoffversagen hervorzurufen. Umgekehrt bleibt alles Grundlagenverständnis für die berufliche Praxis bedeutungslos, wenn es nicht gelingt, die Brücke zur praktischen Anwendung zu schlagen.

Es ist unser Anliegen, dieser Problematik im vorliegenden Buch Rechnung zu tragen. Deshalb wird der Bogen von den materialkundlichen Mechanismen, die bei der mechanischen Beanspruchung maßgeblich sind, bis hin zu den ingenieurwissenschaftlichen Vorgehensweisen bei der Bauteilauslegung gespannt. Will man dabei der beruflichen Praxis gerecht werden, die heute mehr denn je durch den Einsatz aller Werkstoffgruppen geprägt ist, muss man auch die jeweiligen Besonderheiten der Metalle, Keramiken und Polymere berücksichtigen. Entsprechend ist das Buch aufgebaut. Einerseits finden sich Kapitel, die wesentliche mechanischen Beanspruchungsfälle behandeln und werkstoffübergreifende Gesetzmäßigkeiten besprechen (Kapitel 2: elastisches Verhalten; Kapitel 3: Plastizität und Versagen; Kapitel 4: Kerben; Kapitel 5: Bruchmechanik; Kapitel 9: Werkstoffermüdung; Kapitel 10: Kriechen). Die Besonderheiten im mechanischen Verhalten der oben angesprochenen Werkstoffgruppen, die sich aus deren Aufbau und den daraus resultierenden mikrostrukturellen Vorgängen im Materialinneren ergeben, werden zudem in gesonderten Kapiteln (Kapitel 6: Metalle; Kapitel 7: Keramiken; Kapitel 8: Polymere) behandelt.

Entsprechend soll das vorliegende Buch umfassend über das »Mechanische Verhalten der Werkstoffe« informieren. Es richtet sich an Studierende des Maschinenbaus und der Materialwissenschaften sowie an Ingenieure in der beruflichen Praxis, die sich mit der mechanischen Auslegung von Bauteilen beschäftigen. Obwohl sich das Buch vertieft mit dem mechanischen Werkstoffverhalten befasst und in dem Sinne kein »Einsteigerbuch« ist, sind die dargestellten Sachverhalte auch ohne vertiefte werkstoffphysikalische und werkstoffmechanische Vorkenntnisse verständlich. Deswegen finden sich am Anfang des Buches ein einführendes Kapitel zum Aufbau der Werkstoffe sowie Anhänge zu den Themen Tensorrechnung, Kristallorientierungen und Thermodynamik.

Das Buch ist aus einer gleichnamigen Vorlesung entstanden, die in der Fachrichtung »Allgemeiner Maschinenbau« an der TU Braunschweig nach dem Vordiplom gehalten wird.

Oftmals erschien es uns wünschenswert, Hintergrundinformationen für besonders interessierte Leser zu geben, die über den Lehrstoff wesentlich hinausgehen bzw. angrenzende Gebiete berühren. Da sie ohne Nachteil für das weitere Verständnis auch übersprungen werden können, sind sie als eingerückte Abschnitte besonders zu erkennen oder, im Falle umfangreicherer Abhandlungen, im Anhang aufgeführt.

Am Ende des Textteils befinden sich Übungsaufgaben mit ausgearbeiteten Lösungen. Sie dienen als Rechenbeispiele für die im Text erläuterten Zusammenhänge und sollen eine kritische Überprüfung des erarbeiteten Wissens ermöglichen.

Besonders bedanken möchten wir uns bei Herrn Prof. Dr. Günter Lange, der uns wertvolle Hilfe bei der Ausarbeitung des Buches gegeben hat. Für die freundliche Bereitstellung von Bildmaterial danken wir Prof. Dr. Jürgen Huber (CeramTec AG), Prof. Dr. Peter Neumann (Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH), Dr. Volker Saß (ThyssenKrupp Nirosta GmbH), Dr. Johannes Stoiber (Allianz-Zentrum für Technik GmbH), der Lufthansa Technik AG, dem Institut für Werkstofftechnik der Universität Gh Kassel, dem Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig, dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, sowie den Mitarbeitern am Institut für Werkstoffe der TU Braunschweig. Dr. Steffen Müller hat maßgeblich zur Ausgestaltung des Vorlesungsmanuskriptes beigetragen, das als Vorlage für dieses Buch diente. Weiterhin danken wir Timo Franz und Dr. Knut Hupfer, die das Manuskript Korrektur gelesen haben. Dem Teubner-Verlag und insbesondere Herrn Dr. Martin Feuchte möchten wir für die gute Zusammenarbeit danken.

Braunschweig, im April 2003

Joachim Rösler, Harald Harders, Martin Bäker

Inhaltsverzeichnis

1	Aufbau der Werkstoffe	1
1.1	Atomaufbau und chemische Bindung	1
1.2	Metalle	5
1.2.1	Metallische Bindung	5
1.2.2	Kristallstrukturen	7
1.2.3	Polykristalline Metalle	13
1.3	Keramiken	15
1.3.1	Kovalente Bindung	16
1.3.2	Ionenbindung	17
1.3.3	Dipolbindung	18
1.3.4	Van-der-Waals-Bindung	19
1.3.5	Wasserstoffbrückenbindung	19
1.3.6	Kristallstruktur von Keramiken	20
1.3.7	Amorphe Keramiken	22
1.4	Polymere	23
1.4.1	Chemischer Aufbau der Polymere	23
1.4.2	Struktur der Polymere	25
2	Elastisches Verhalten	29
2.1	Arten der Verformung	29
2.2	Spannung und Dehnung	29
2.2.1	Spannung	30
2.2.2	Dehnung	32
2.3	Atomare Wechselwirkungen	35
2.4	Hookesches Gesetz	37
2.4.1	Energie der elastischen Verformung	37
2.4.2	Elastische Verformung bei mehrachsiger Beanspruchung	40
2.4.3	Isotropes Material	41
2.4.4	Kubisches Kristallgitter	46
2.4.5	Andere Kristallgitter	48
2.4.6	Beispiele	49
2.5	Isotropie und Anisotropie makroskopischer Bauteile	49
2.6	Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls	53
2.7	Möglichkeiten zur Erhöhung des Elastizitätsmoduls	55
2.7.1	Verbundwerkstoffe	56
2.7.2	Effekt von Legierungselementen	59

3	Plastizität und Versagen	61
3.1	Technische und wahre Dehnung	61
3.2	Spannungs-Dehnungs-Kurven	66
3.2.1	Analyse eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms	70
3.2.2	Approximation der Spannungs-Dehnungs-Kurve	78
3.3	Plastizitätstheorie	80
3.3.1	Fließbedingungen	81
3.3.2	Fließbedingungen für Metalle	84
3.3.3	Fließbedingungen für Polymere	90
3.3.4	Fließgesetze	91
3.3.5	Verfestigungsgesetze	95
3.3.6	Anwendung von Fließbedingung, Fließgesetz und Verfestigungsgesetz	100
3.4	Härte	104
3.4.1	Ritzverfahren	105
3.4.2	Eindruckverfahren	105
3.4.3	Rücksprungverfahren	107
3.5	Werkstoffversagen	107
3.5.1	Gleitbruch	108
3.5.2	Spaltbruch	111
3.5.3	Bruchkriterien	112
4	Kerben	117
4.1	Kerbformzahl	117
4.2	Neuber-Regel	120
4.3	Kerbeinfluss im Zugversuch	123
5	Bruchmechanik	127
5.1	Einführung in die Bruchmechanik	127
5.1.1	Begriffsdefinitionen	127
5.2	Linear-elastische Bruchmechanik	129
5.2.1	Spannungsfeld an der Rissspitze	129
5.2.2	Energiebetrachtung bei Rissfortschritt	132
5.2.3	Werkstoffverhalten bei Rissfortschritt	140
5.2.4	Materialkennwerte verschiedener Werkstoffe	142
5.2.5	Statische Auslegung rissbehafteter Bauteile	143
5.2.6	Experimentelle Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte	146
5.3	Fließbruchmechanik	154
5.3.1	Risspitzenöffnung (CTOD)	154
5.3.2	J -Integral	155
5.3.3	Werkstoffverhalten bei Rissfortschritt	157
5.3.4	Experimentelle Bestimmung fließbruchmechanischer Kennwerte	159

6 Mechanisches Verhalten der Metalle	161
6.1 Theoretische Festigkeit	161
6.2 Versetzungen	162
6.2.1 Versetzungstypen	162
6.2.2 Spannungsfeld um eine Versetzung	164
6.2.3 Bewegung von Versetzungen	167
6.2.4 Gleitsysteme	170
6.2.5 Schmid'sches Schubspannungsgesetz	174
6.2.6 Taylorfaktor	177
6.2.7 Wechselwirkung von Versetzungen	179
6.2.8 Entstehung, Multiplikation und Vernichtung von Versetzungen	180
6.2.9 Kräfte auf Versetzungen	183
6.3 Überwindung von Hindernissen	185
6.3.1 Athermische Vorgänge	185
6.3.2 Thermisch aktivierte Hindernis-Überwindung	189
6.3.3 Duktil-Spröd-Übergang	191
6.3.4 Klettern	192
6.3.5 Schneiden von Versetzungen	193
6.4 Verfestigungsmechanismen	194
6.4.1 Verformungsverfestigung	194
6.4.2 Feinkornhärtung	196
6.4.3 Mischkristallhärtung	200
6.4.4 Teilchenhärtung	205
6.4.5 Härten von Stahl	215
6.5 Mechanische Zwillingsbildung	220
7 Mechanisches Verhalten der Keramiken	223
7.1 Herstellung von Keramiken	223
7.2 Festigkeit von Keramiken	224
7.2.1 Weibullstatistik	225
7.2.2 Ermittlung der Werkstoffkennwerte σ_0 und m	230
7.3 Maßnahmen zur Festigkeitssteigerung	234
7.3.1 Reduzierung der Defektgröße	234
7.3.2 Behinderung der Rissausbreitung	235
8 Mechanisches Verhalten der Polymere	245
8.1 Physikalische Eigenschaften der Polymere	245
8.1.1 Relaxationsprozesse	245
8.1.2 Glasübergangstemperatur	248
8.1.3 Schmelztemperatur	249
8.2 Zeitabhängige Verformung der Polymere	251
8.2.1 Phänomenologische Beschreibung der Zeitabhängigkeit	251
8.2.2 Zeitabhängigkeit und thermische Aktivierung	255
8.3 Elastische Eigenschaften der Polymere	258
8.3.1 Elastische Eigenschaften der Thermoplaste	258

8.3.2	Elastische Eigenschaften von Elastomeren und Duromeren	262
8.4	Plastisches Verhalten	263
8.4.1	Amorphe Thermoplaste	264
8.4.2	Teilkristalline Thermoplaste	270
8.5	Maßnahmen zur Erhöhung der Temperaturbeständigkeit	270
8.5.1	Erhöhung der Glastemperatur und der Schmelztemperatur	271
8.5.2	Erhöhung des kristallinen Anteils	273
8.6	Maßnahmen zur Erhöhung von Festigkeit und Elastizitätsmodul	275
8.6.1	Faserverstärkung	276
8.7	Maßnahmen zur Erhöhung der Duktilität	277
8.8	Umwelteinflüsse	279
9	Werkstoffermüdung	281
9.1	Belastungsarten	281
9.2	Versagensmechanismen	284
9.2.1	Anrissbildung	285
9.2.2	Risswachstum (Ausbreitungsstadium II)	289
9.2.3	Restbruch	297
9.3	Ermüdung glatter Proben	297
9.3.1	Begriffsdefinition und Versuchsführung	298
9.3.2	Faustregeln für die Wechselfestigkeit σ_W	302
9.3.3	Mittelspannungseinfluss	303
9.3.4	Schadensakkumulationsregel	306
9.3.5	Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven	307
9.4	Kitagawa-Diagramm	309
9.5	Einfluss von Kerben	311
10	Kriechen	319
10.1	Phänomenologie	319
10.2	Kriechmechanismen	324
10.2.1	Kriechstadien	324
10.2.2	Versetzungskriechen	325
10.2.3	Diffusionskriechen	328
10.2.4	Korngrenzengleiten	331
10.2.5	Verformungsmechanismen-Diagramme	332
10.3	Kriechbruch	336
10.4	Erhöhung der Kriechbeständigkeit von Werkstoffen	337
11	Aufgaben	343
1	Packungsdichten von Kristallen	343
2	Makromoleküle	343
3	Wechselwirkung zwischen zwei Atomen	343
4	Kompressionsmodul	344
5	Zusammenhang zwischen den elastischen Konstanten	344
6	Bonbonwurfmaschine	345

7	Faserverbundwerkstoffe	345
8	Wahre Dehnung	346
9	Zinsrechnung	346
10	Große Deformationen	346
11	Theoretische Festigkeit	347
12	Fließkriterien	347
13	Fließkriterien für Polymere	348
14	Auslegung einer gekerbten Welle	348
15	Bestimmung der Risszähigkeit K_{Ic}	349
16	Statische Auslegung eines Rohres	349
17	Abschätzung der Versetzungsdichte	350
18	Thermisch aktivierte Entstehung von Versetzungen	350
19	Verformungsverfestigung	350
20	Feinkornhärtung	351
21	Ausscheidungshärtung	351
22	Weibull-Statistik	351
23	Auslegung eines Flüssigkeitsbehälters	351
24	Mechanische Modelle für viskoelastische Polymere	352
25	Elastische Dämpfung	353
26	Eyring-Plot	353
27	Abschätzung der Bruchschwingspielzahl	353
28	Miner-Regel	354
29	Larson-Miller-Parameter	355
30	Kriechverformung	355
31	Abbau thermischer Spannungen durch Kriechen	355
12 Lösungen		357
Anhang		377
A Tensorrechnung		379
A.1	Einführung	379
A.2	Tensorstufen	379
A.3	Schreibweisen	380
A.4	Rechenoperationen und einsteinsche Summenkonvention	381
A.5	Koordinatentransformationen	383
A.6	Wichtige Konstanten und Tensorfunktionen	385
A.7	Invarianten	386
A.8	Ableitungen von Tensoren	387
B Millersche und miller-bravaissche Indizes		389
B.1	Millersche Indizes	389
B.2	Miller-bravaissche Indizes	389

C Thermodynamische Grundlagen	391
C.1 Thermische Aktivierung	391
C.2 Freie Energie und freie Enthalpie	392
C.3 Phasenübergänge und Phasendiagramme	394
D Das J-Integral	399
D.1 Unstetigkeiten, Singularitäten und der gaußsche Integralsatz	399
D.2 Energie-Impuls-Tensor	401
D.3 J -Integral	402
D.4 J -Integral um eine Rissspitze	404
D.5 Plastizität an der Rissspitze	407
D.6 Energie-Interpretation des J -Integrals	408
Literatur	411
Verzeichnis wichtiger Formelzeichen	417
Stichwortverzeichnis	421