
Ewald Werner • Erhard Hornbogen
Norbert Jost • Gunther Eggeler

Fragen und Antworten zu Werkstoffe

8., aktualisierte Auflage

Ewald Werner
TU München
Garching, Deutschland

Norbert Jost
FH Pforzheim
Pforzheim, Deutschland

Erhard Hornbogen
Universität Bochum
Bochum, Deutschland

Gunther Eggeler
Universität Bochum
Bochum, Deutschland

ISSN 0937-7433
Springer-Lehrbuch
ISBN 978-3-642-53949-7 ISBN 978-3-642-53950-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-53950-3

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1987, 1991, 1995, 2002, 2005, 2010, 2012, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Vorwort zur achten Auflage

Der ungebrochen starke Anstieg der Studierendenzahlen in den ingenieurwissenschaftlichen Fächern und das große Interesse, das der siebenten Auflage des Übungsbuches entgegen gebracht wurde, machten eine Neuauflage notwendig. Diese haben wir zur redaktionellen Überarbeitung und zur Ergänzung genutzt. Wir hoffen, dass das Buch den Studierenden dadurch wertvolle Hinweise für das Erlernen des Stoffes und Hilfestellung bei der Vorbereitung auf Prüfungen bietet.

Neu in dieser Auflage ist die Einteilung der Aufgaben nach Schwierigkeitsgrad. Wir haben uns für drei Schwierigkeitsgrade entschieden (leicht: L, mittelschwer: M, schwer: S) und die Kennzeichnungen M und S der Aufgaben dem Aufgabentext nachgestellt. Leichte Aufgaben und ihre Antworten vermitteln Sachverhalte und Begriffe, die durch Lesen der entsprechenden Abschnitte z.B. des Lehrbuches „Werkstoffe“ sowie durch das Studium der Antworten erlernt werden sollten. Mittelschwere Fragen erfordern es, werkstoffkundliche Grundlagen heranzuziehen, um die richtige Antwort zu erarbeiten. Schwere Aufgaben schließlich setzen Kenntnisse aus einigen Grundlagenfächern voraus (Physik, Chemie, Mechanik) und münden oft in umfangreichen Rechnungen.

Dem Springer-Verlag danken wir für die gute Zusammenarbeit und die ansprechende Ausstattung des Buches.

München, Potsdam, Wiernsheim, Bochum im Juni 2015

Ewald Werner
Erhard Hornbogen
Norbert Jost
Gunther Eggeler

Vorwort zur sechsten Auflage

Das Buch „Fragen und Antworten zu Werkstoffe“ hat sich seit mittlerweile mehr als zwanzig Jahren bestens bewährt und erfreut sich bei den Studierenden großer Beliebtheit. Der erfreulich rasche Verkauf der fünften Auflage, zurück zu führen auf den starken Anstieg der Studierendenzahlen in den ingenieurwissenschaftlichen Fächern seit der Jahrtausendwende, machte eine Neuauflage des Übungsbuches notwendig. Im Zuge dieser Neubearbeitung blieb die Grundidee des Werkes trotz der zahlreichen Neuerungen unverändert: Das Buch soll, wie schon seit seiner ersten Auflage, den Studierenden werkstoffkundlicher Fächer beim Erlernen und Verstehen der oft schwierigen Grundbegriffe Hilfestellung bieten und es auch ermöglichen, das erworbene Wissen durch das selbständige Lösen von Übungsaufgaben zu festigen. Deutlich warnen wollen wir aber vor einem reinen Nachlesen der Lösungen und Antworten. Sinnvoll wird diese Sammlung nur dann genutzt, wenn die Leserin oder der Leser zunächst selbständig versucht, zur Lösung einer Aufgabe zu gelangen und erst danach auf den im Antwortenteil angebotenen Lösungsweg blickt. Selbstverständlich kann diese Sammlung kein Lehrbuch ersetzen. Wem die theoretischen Grundlagen oder die Begründung verschiedener Formeln und Zusammenhänge nicht mehr geläufig sind, den verweisen wir auf das Lehrbuch „Werkstoffe“ sowie auf die darin enthaltenen Literaturempfehlungen.

Die nun vorliegende sechste Auflage erfuhr gegenüber ihrer Voraufgabe eine Reihe von Veränderungen.

1. In der neunten Auflage des Lehrbuchs „Werkstoffe“, welche gemeinsam von Erhard Hornbogen, Gunther Eggeler und Ewald Werner erstellt wurde, finden sich zu jedem der dreizehn Kapitel eine Reihe von Kontrollfragen. Die Antworten auf die meisten dieser Fragen werden in den entsprechenden Kapiteln des Übungsbuches gegeben.
2. Zahlreiche Prüfungsfragen, die in den letzten Jahren an der TU München im Rahmen der schriftlichen Prüfungen zu den Fächern Werkstoffkunde und Werkstofftechnik für Maschinenbauer und Chemieingenieure gestellt wurden, finden sich samt ausführlicher Lösungen in dieser Auflage.
3. Einige Themengebiete wurden verstärkt. Dies betrifft die Kristallographie, Eigenschaften des reziproken Gitters, die Analyse von Gefügen mit Röntgen- und Elektronenstrahlen. Ebenso aufgenommen wurden neue Fragen und Rechenbeispiele zu Versetzungen, zur Korrosion und zur Werkstofftechnik. Es ist zu hoffen, dass damit eine thematische Abrundung gelungen ist.

4. Die neue Auflage wurde nicht nur in ihrem Erscheinungsbild der aktuellen neunten Auflage des Lehrbuches angepasst, sondern orientiert sich auch thematisch noch enger als bisher an dem dort gebotenen Lernstoff.

Zwei der Autoren (Ewald Werner und Gunther Eggeler) treten anlässlich dieser Neuauflage als Autoren hinzu. Damit ist sichergestellt, dass das Buch auch in Zukunft wertvoller Wegbegleiter der Studierenden an Technischen Universitäten und Fachhochschulen bleiben wird.

Gedankt sei an dieser Stelle dem Springer-Verlag für die gute Zusammenarbeit und die ansprechende Ausstattung des Buches. Besonderer Dank gilt Herrn Anton Mühlemann für die vorzügliche Anfertigung der Bilder, Frau Yvonne Jahn für das sorgfältige Korrekturlesen und Herrn Robert Werner für neue Aufgaben und seine Hilfe bei der Erstellung von Teilen des Manuskripts. Gedankt sei an dieser Stelle auch Frau Cornelia Schwarz für so manchen \LaTeX -Trick, sowie Christian Kremaszky, Wolfgang Loos, Benjamin Regener, Matthias Dünckelmeyer, Florian Hairer und Michael Ries für die Nachbearbeitung von Bildern und Prüfungsaufgaben. Ebenso gebührt Dank den Mitarbeitern des Lehrstuhls Werkstoffwissenschaft der Ruhr-Universität Bochum für ihre Hilfe beim Korrekturlesen.

Wir wünschen allen Studierenden der Ingenieur- und auch der Naturwissenschaften, die sich auf werkstoffkundliche Prüfungen vorbereiten, viel Erfolg beim Durcharbeiten dieses Buches.

München, Potsdam, Wiernsheim, Bochum im Juli 2009

Ewald Werner
Erhard Hornbogen
Norbert Jost
Gunther Eggeler

Vorwort zur ersten Auflage

Die Werkstoffwissenschaft bildet neben Mechanik, Thermo- und Fluiddynamik und anderen Teilgebieten von Physik und Chemie eines der Grundlagenfächer für Studenten der Ingenieurwissenschaften. Im Gegensatz dazu hat sich die Werkstoffwissenschaft erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts als ein einheitliches Sachgebiet profiliert. Den Kern dieses Fachs bildet die Mikrostruktur des Werkstoffs, die zu den gewünschten verbesserten oder gar ganz neuen technischen Eigenschaften führt. Die Werkstoffwissenschaft behandelt vergleichend alle Werkstoffgruppen: Metalle, Halbleiter, Keramik, Polymere und die aus beliebigen Komponenten zusammengesetzten Verbundwerkstoffe. Diese Grundlage erlaubt dem konstruierenden Ingenieur am besten, den für einen bestimmten Zweck günstigsten Werkstoff auszuwählen.

In diesem Sinne soll dieses Buch eine Hilfe gewähren für die Einführung in die Werkstoffwissenschaft. Im Rahmen der dazu notwendigen Grundlagen und Systematik ist eine größere Zahl von Begriffen zu definieren, mit denen dann in der Praxis gearbeitet werden kann. Dies bereitet den Studierenden der Ingenieurwissenschaft erfahrungsgemäß am Anfang gewisse Schwierigkeiten. Ziel dieses Buches ist es, eine Hilfe beim Erlernen der Grundbegriffe der Werkstoffwissenschaft zu leisten. Der Text und Inhalt sind abgestimmt mit dem Buch „Werkstoffe“, 4. Aufl., Springer 1987. Dort sind auch ein den Inhalt dieses Buches weiter vertiefender Text sowie ausführliche Hinweise auf spezielle Literatur zu finden.

Die Form von „Fragen und Antworten“ macht das Buch besonders zum Selbststudium oder zum Erneuern älteren Wissens geeignet. Die mit „*“ gekennzeichneten Fragen behandeln spezielle Aspekte, die nicht unbedingt Prüfungsstoff eines ingenieurwissenschaftlichen Vordiploms sind. Sie können beim ersten Durcharbeiten übergangen werden. Im Anhang sind dann noch die wichtigsten Fachzeitschriften zum Thema Werkstoffe zusammengestellt. Dies soll dem Leser vor allen Dingen ein schnelles Auffinden der Zeitschriften in Bibliotheken sowie ein weiter vertiefendes Literaturstudium ermöglichen.

Die Autoren möchten Herrn cand. ing. L. Kahlen und Frau cand. phil. G. Fries für die Hilfe bei der Fertigstellung des Manuskriptes danken. Doch auch viele ungenannte Studierende haben mit Ihren Fragen und Anregungen zum Inhalt des vorliegenden Buches beigetragen.

Bochum, im August 1987

*E. Hornbogen
N. Jost
M. Thumann*

Inhaltsverzeichnis

I	Fragen	
1	Überblick	
1.1	Werkstoffe, Werkstoffkunde	5
1.2	Werkstoffgruppen, Aufbau der Werkstoffe	5
1.3	Eigenschaften der Werkstoffe	6
1.4	Bezeichnung der Werkstoffe	6
1.5	Geschichte und Zukunft, Nachhaltigkeit	7
2	Aufbau fester Phasen	
2.1	Atome und Elektronen	11
2.2	Bindung der Atome und Moleküle	12
2.3	Kristalle	13
2.4	Baufehler	18
2.5	Korngrenzen, Stapelfehler und homogene Gefüge	22
2.6	Gläser und Quasikristalle	22
2.7	Analyse von Mikrostrukturen	23
3	Aufbau mehrphasiger Stoffe	
3.1	Mischphasen und Phasengemische	31
3.2	Heterogene Gleichgewichte	32
3.3	Keimbildung, Kristallisation von Schmelzen	34
3.4	Metastabile Gleichgewichte	35
3.5	Anwendungen von Phasendiagrammen	36
4	Grundlagen der Wärmebehandlung	
4.1	Diffusion	41
4.2	Kristallerholung und Rekristallisation	45
4.3	Umwandlungen und Ausscheidung	45
4.4	Martensitische Umwandlung	47
4.5	Wärmebehandlung, Gefüge, Nanostrukturen	48
5	Mechanische Eigenschaften	
5.1	Mechanische Beanspruchung und Elastizität	53
5.2	Zugversuch und Kristallplastizität	54
5.3	Kriechen	57
5.4	Bruchmechanik, Ermüdung	58
5.5	Viskosität, Viskoelastizität und Dämpfung	63
5.6	Technologische Prüfverfahren	63

6	Physikalische Eigenschaften	
6.1	Kernphysikalische Eigenschaften	69
6.2	Elektrische Eigenschaften	69
6.3	Wärmeleitfähigkeit, thermische Ausdehnung	71
6.4	Ferromagnetische Eigenschaften	73
6.5	Formgedächtnis, Sensor- und Aktorwerkstoffe	74
7	Chemische und tribologische Eigenschaften	
7.1	Oberflächen und Versagen des Werkstoffs	77
7.2	Elektrochemische Korrosion.....	77
7.3	Verzundern	79
7.4	Spannungsrissskorrosion	80
7.5	Oberflächen, Grenzflächen und Adhäsion	81
7.6	Reibung und Verschleiß.....	81
8	Keramische Werkstoffe	
8.1	Allgemeine Kennzeichnung.....	85
8.2	Nichtoxidische Verbindungen	86
8.3	Kristalline Oxidkeramik	86
8.4	Anorganische nichtmetallische Gläser	89
8.5	Hydratisierte Silikate, Zement, Beton.....	90
9	Metallische Werkstoffe	
9.1	Allgemeine Kennzeichnung.....	95
9.2	Mischkristalle	95
9.3	Ausscheidungshärtung, Al-, Ni-Legierungen	96
9.4	Umwandlungshärtung, Stähle	99
9.5	Gusslegierungen und metallische Gläser	101
10	Polymerwerkstoffe	
10.1	Allgemeine Kennzeichnung.....	105
10.2	Plastomere, Duromere, Elastomere.....	106
10.3	Mechanische Eigenschaften von Polymeren.....	107
10.4	Natürliche Polymere.....	109
11	Verbundwerkstoffe	
11.1	Eigenschaften von Phasengemischen.....	113
11.2	Faserverstärkte Werkstoffe	113
11.3	Stahlbeton und Spannbeton	116
11.4	Schneidwerkstoffe.....	116
11.5	Oberflächenbehandlung.....	117
11.6	Holz	117

12	Werkstoff und Fertigung	
12.1	Halbzeug und Bauteil	121
12.2	Urformen	121
12.3	Umformen	123
12.4	Trennen	124
12.5	Fügen	124
12.6	Nachbehandlung, Lasermaterialbearbeitung	126
12.7	Werkstoffaspekte bei Kraftfahrzeugen	127
13	Der Kreislauf der Werkstoffe	
13.1	Rohstoff und Energie	131
13.2	Auswahl, Gebrauch, Versagen, Sicherheit	131
13.3	Entropieeffizienz und Nachhaltigkeit	134
13.4	Recycling am Beispiel Kraftfahrzeug	135
II	Antworten	
1	Überblick	
1.1	Werkstoffe, Werkstoffkunde	141
1.2	Werkstoffgruppen, Aufbau der Werkstoffe	142
1.3	Eigenschaften der Werkstoffe	144
1.4	Bezeichnung der Werkstoffe	146
1.5	Geschichte und Zukunft, Nachhaltigkeit	150
2	Aufbau fester Phasen	
2.1	Atome und Elektronen	153
2.2	Bindung der Atome und Moleküle	156
2.3	Kristalle	162
2.4	Baufehler	178
2.5	Korngrenzen, Stapelfehler und homogene Gefüge	186
2.6	Gläser und Quasikristalle	189
2.7	Analyse von Mikrostrukturen	191
3	Aufbau mehrphasiger Stoffe	
3.1	Mischphasen und Phasengemische	203
3.2	Heterogene Gleichgewichte	205
3.3	Keimbildung, Kristallisation von Schmelzen	209
3.4	Metastabile Gleichgewichte	213
3.5	Anwendungen von Phasendiagrammen	215
4	Grundlagen der Wärmebehandlung	
4.1	Diffusion	221
4.2	Kristallerholung und Rekristallisation	228

4.3	Umwandlungen und Ausscheidung	230
4.4	Martensitische Umwandlung	234
4.5	Wärmebehandlung, Gefüge, Nanostrukturen	239
5	Mechanische Eigenschaften	
5.1	Mechanische Beanspruchung und Elastizität	247
5.2	Zugversuch und Kristallplastizität	252
5.3	Kriechen	261
5.4	Bruchmechanik, Ermüdung	263
5.5	Viskosität, Viskoelastizität und Dämpfung	276
5.6	Technologische Prüfverfahren	279
6	Physikalische Eigenschaften	
6.1	Kernphysikalische Eigenschaften	285
6.2	Elektrische Eigenschaften	288
6.3	Wärmeleitfähigkeit, thermische Ausdehnung	297
6.4	Ferromagnetische Eigenschaften	301
6.5	Formgedächtnis, Sensor- und Aktorwerkstoffe	303
7	Chemische und tribologische Eigenschaften	
7.1	Oberflächen und Versagen des Werkstoffs	307
7.2	Elektrochemische Korrosion	308
7.3	Verzundern	313
7.4	Spannungsrisskorrosion	315
7.5	Oberflächen, Grenzflächen und Adhäsion	317
7.6	Reibung und Verschleiß	318
8	Keramische Werkstoffe	
8.1	Allgemeine Kennzeichnung	323
8.2	Nichtoxidische Verbindungen	325
8.3	Kristalline Oxidkeramik	327
8.4	Anorganische nichtmetallische Gläser	329
8.5	Hydratisierte Silikate, Zement, Beton	332
9	Metallische Werkstoffe	
9.1	Allgemeine Kennzeichnung	337
9.2	Mischkristalle	338
9.3	Ausscheidungshärtung, Al-, Ni-Legierungen	340
9.4	Umwandlungshärtung, Stähle	342
9.5	Gusslegierungen und metallische Gläser	347
10	Polymerwerkstoffe	
10.1	Allgemeine Kennzeichnung	351

10.2	Plastomere, Duromere, Elastomere.....	353
10.3	Mechanische Eigenschaften von Polymeren.....	356
10.4	Natürliche Polymere.....	361
11	Verbundwerkstoffe	
11.1	Eigenschaften von Phasengemischen.....	365
11.2	Faserverstärkte Werkstoffe.....	366
11.3	Stahlbeton und Spannbeton.....	370
11.4	Schneidwerkstoffe.....	371
11.5	Oberflächenbehandlung.....	372
11.6	Holz.....	373
12	Werkstoff und Fertigung	
12.1	Halbzeug und Bauteil.....	377
12.2	Urformen.....	378
12.3	Umformen.....	384
12.4	Trennen.....	389
12.5	Fügen.....	390
12.6	Nachbehandlung, Lasermaterialbearbeitung.....	394
12.7	Werkstoffaspekte bei Kraftfahrzeugen.....	396
13	Der Kreislauf der Werkstoffe	
13.1	Rohstoff und Energie.....	401
13.2	Auswahl, Gebrauch, Versagen, Sicherheit.....	402
13.3	Entropieeffizienz und Nachhaltigkeit.....	408
13.4	Recycling am Beispiel Kraftfahrzeug.....	411
A	Anhang	
A.1	Begriffe.....	417
A.2	Fachzeitschriften.....	440