
Werkstoffe

Erhard Hornbogen · Gunther Eggeler ·
Ewald Werner

Werkstoffe

Aufbau und Eigenschaften von Keramik-,
Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen

12., aktualisierte Auflage

Erhard Hornbogen
Potsdam, Deutschland

Gunther Eggeler
Universität Bochum
Bochum, Deutschland

Ewald Werner
TU München
Garching, Deutschland

ISBN 978-3-662-58846-8 ISBN 978-3-662-58847-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58847-5>

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 GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 1973, 1979, 1983, 1987, 1991, 1994, 2002, 2006, 2008, 2012, 2017, 2019

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur zwölften Auflage

Der erfreulich rasche Verkauf der elften Auflage zeigt, dass sich das Lehrbuch „Werkstoffe“ auch nach mehr als vierzig Jahren seit der Erstauflage großer Beliebtheit erfreut. Dies war Ansporn, die nun vorliegende zwölfte Auflage erneut zu aktualisieren, um der fortwährenden Entwicklung des Fachgebietes der Werkstoffe Rechnung zu tragen. Aus diesem Grund wurden zahlreiche Abbildungen und Tabellen mit neueren Daten versehen. Schließlich wurde das Literaturverzeichnis aktualisiert und einige Druckfehler der Voraufgabe ausgebessert.

Im seit vielen Jahren zur Verfügung stehenden Begleitbuch „Fragen und Antworten zu Werkstoffe“ finden sich nicht nur eine Vielzahl von Fragen und Antworten zu allen Themen der Werkstoffkunde, sondern auch die Antworten auf die Kontrollfragen, die am Ende der dreizehn Kapitel des Lehrbuches gestellt werden.

Mit der vorliegenden Auflage erscheint das Lehrbuch im Neusatz mit verändertem Layout. Damit soll die Lesbarkeit der elektronischen Version des Buches auf verschiedenen Endgeräten verbessert werden. Dies betrifft in gleicher Weise das Übungsbuch (10. Auflage), welches künftig stets zeitgleich zum Lehrbuch in neuer Auflage erscheinen wird. Dem Springer-Verlag danken wir für die stets gute Zusammenarbeit und die ansprechende Ausstattung des Buches.

Potsdam
Bochum
München
2019

Erhard Hornbogen
Gunther Eggeler
Ewald Werner

Vorwort zur achten Auflage

Die Werkstoffwissenschaft ist eines der Grundlagenfächer der Ingenieurwissenschaften, die den Zusammenhang von Struktur und Eigenschaften aller für die Technik bedeutsamen festen Stoffe behandelt. Sie ist im wesentlichen im Laufe des 20. Jahrhunderts entstanden und zu gewisser Reife gelangt. Ihre Ursprünge waren empirischer Natur. Die Stahlhärtung beschreibt bereits Homer sachgerecht. Einige Namen seien erwähnt, welche die Situation zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts kennzeichnen:

Adolf Martens (1850–1914), Ingenieur – betrachtete und analysierte als erster die während der Stahlhärtung ablaufende strukturelle Phasenumwandlung im Mikroskop.

Alfred Wilm (1869–1937), Chemiker – entdeckte die Ausscheidungshärtung, entwickelte danach eine heute noch gebrauchte Legierung des Aluminiums. Er wusste aber nicht, dass er damit die erste Nanotechnologie gefunden hatte.

Ludwig Boltzmann (1844–1906), Physiker – erweiterte den aus der Wärmelehre stammenden Begriff der Entropie, so dass er später für die Deutung vieler Eigenschaften der Werkstoffe (Mischbarkeit, Gitterdefekte, Gummielastizität), aber auch für die Analyse und die Bewertung von Stoffkreisläufen nützlich wurde.

Im folgenden 20. Jahrhundert setzten sich zunehmend physikalisches Denken und physikalische Messmethoden in unserem Fachgebiet durch. Dank hochauflösender Mikroskopie bietet heute die Position eines jeden Atoms in der Struktur eines Werkstoffs kaum mehr Geheimnisse.

In der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts war die Werkstoffforschung noch einmal besonders erfolgreich. Die Halbleiter und die daraus abgeleitete Technik sehr kleiner elektronischer Bauelemente (Transistoren), die schließlich in Siliziumkristallen integriert wurden, führten zur zweiten industriellen Revolution. Immer wieder gab es neben der systematischen Erforschung des Gebietes überraschende Entdeckungen, die unsere Kenntnisse sprunghaft erweiterten, deren Nutzen zum Teil noch in den Sternen steht. Dabei denken wir an die metallischen Gläser, Quasikristalle mit fünfzähliger Symmetrie, besonders starke Ferromagnete, die keramischen Hochtemperatur-Supraleiter und die Legierungen mit Formgedächtnis.

Für das Gebiet, das Werkstoffwissenschaft und -technik (Materials Science and Engineering) umfasst, gibt es nur in der deutschen Sprache das Wort „Werkstoffkunde“. Dem entspricht der Inhalt dieses Buches. Allerdings konnten die technischen Aspekte nur knapp und exemplarisch behandelt werden, da hierzu ja auch sämtliche Fertigungstechniken gezählt werden müssen.

Ein Problem besteht darin, dass sich der Umfang des Wissens auf unserem Fachgebiet in den letzten Jahrzehnten so stark vermehrt hat, dass es immer schwieriger wird, der Entwicklung zu folgen, Wichtiges von weniger Wichtigem oder gar von nur Modischem zu unterscheiden. In diesem Buch wird der Versuch unternommen, die Übersicht über das gesamte Gebiet zu bewahren.

Der in den vorhergehenden Auflagen bewährte Aufbau des Buches mit 13 Kapiteln wurde beibehalten. Auf einen einführenden Überblick folgen drei Kapitel, in denen der mikroskopische Aufbau aller Werkstoffgruppen behandelt wird. Die Erörterung der makroskopischen Eigenschaften ist ebenfalls in drei Kapiteln zu finden: mechanische Eigenschaften, die anderen physikalischen Eigenschaften und die chemischen Eigenschaften, insbesondere der Oberflächen, einschließlich Reibung und Verschleiß. Die Einteilung aller Werkstoffe in vier große Gruppen spiegeln die Themen von vier weiteren Kapiteln wider: keramische, metallische, hochpolymere Werkstoffe und Verbundwerkstoffe. Die beiden letzten Kapitel sind werkstofftechnischen Aspekten vorbehalten. Dazu gehört ein systematischer Überblick über die Fertigungsverfahren vom Urformen (Gießen, Sintern, Aufdampfen) über Umformen, Trennen zu den Füge- und Oberflächentechniken. Das letzte Kapitel ist dem gesamten Kreislauf gewidmet, vom Rohstoff zum Werkstoff in Fertigung und Gebrauch. Am Ende führen die verschiedenen Möglichkeiten des Versagens zum Abfall, zum Schrott. Die Rückgewinnung gebrauchter Stoffe steht in Zusammenhang mit dem Begriff der „nachhaltigen Technik“, also einem sehr aktuellen Thema für die zukünftige Werkstoffkunde.

Das Buch soll die nötige „Allgemeinbildung“ über Werkstoffe vermitteln, die von den Studenten der Ingenieurwissenschaften an Technischen Hochschulen erwartet wird. Es ist auch für alle Naturwissenschaftler, vielleicht auch für Wirtschaftswissenschaftler nützlich, die im fortgeschrittenen Studium oder im Berufsleben mit Werkstoffen zu tun haben, und sich einen Überblick über dieses uralte (4000 Jahre seit Beginn der Bronzezeit!), gleichzeitig junge und immer noch in reger Entwicklung befindliche Gebiet verschaffen wollen. Das Buch ist bemüht um eine knappe, systematische Darstellung auf neuestem Stand. Der Autor wäre besonders erfreut, wenn es intelligente, junge Menschen zu aktiver Beschäftigung, zu eigener Forschung auf diesem reizvollen und nützlichen Gebiet der angewandten Wissenschaft anregen könnte.

Wie wird die Zukunft unseres Fachgebietes aussehen?

Natürlich wissen wir nicht, ob und welche überraschenden Entdeckungen zu erwarten sind. Drei wesentliche Entwicklungen sind aber heute bereits ablesbar:

Die Nanotechnik führt zur gezielten Herstellung mikroskopischer Strukturen, die ihre natürliche Grenze in atomaren Abmessungen finden. Quantenmechanische Aspekte werden dabei an Bedeutung gewinnen. Für technische Entwicklungen besteht hier noch ein weiter Spielraum.

Die Fülle größtenteils schon vorhandener werkstoffwissenschaftlicher Kenntnisse wird im Rahmen von Modellierungsprogrammen kombiniert und optimiert. Weniger grundlegende Erkenntnisse als vielmehr ein Vordringen in höhere Ebenen der Komplexität und daraus folgender technischer Nutzen ist zu erwarten.

Als Ergänzung zum analytischen wissenschaftlichen Vorgehen (z. B. Untersuchungen am Einkristall) wird die integrierende Behandlung der gesamten Folge der Stoffumwandlungen in Kreisläufen größere Aufmerksamkeit finden. Das wichtigste wissenschaftliche Werkzeug dafür ist die (statistische) Thermodynamik. Den Weg zu einer umfassenden Umweltethik könnte der Begriff der Entropieeffizienz bereiten.

Für die 8. Auflage ist die Anordnung des Stoffes der früheren Auflagen im wesentlichen übernommen worden. Als neue Abschnitte findet der Leser aber: 2.5 Korngrenzen und homogene Gefüge, 5.6 Gummi- und Pseudoelastizität, 6.5 Supraleiter, 6.8 Formgedächtnis, 10.7 natürliche Polymere, 13.1 Vom Werkstoff zum Schrott und 13.5 Entropieeffizienz und Nachhaltigkeit.

Die Zahl der Gefügeaufnahmen wurde erneut vermehrt. Folgende Abkürzungen dienen zur Kennzeichnung der Untersuchungsmethoden:

DLM	Durchlichtmikroskopie
RLM	Rückstrahllichtmikroskopie
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
REM	Rasterelektronenmikroskopie
EB	Elektronenbeugung

Bei der Herstellung des Manuskriptes bin ich Frau Ursula Schulz, Bochum, zu Dank verpflichtet, und natürlich, in langjährig bewährter Weise, den Mitarbeitern des Springer-Verlags (in Heidelberg und Berlin).

Im Frühjahr 2005

Erhard Hornbogen

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick	1
1.1	Was ist ein Werkstoff?	1
1.2	Werkstoffkunde	4
1.3	Mikroskopischer Aufbau, die vier Werkstoffgruppen	7
1.4	Werkstoffeigenschaften	12
1.5	Prüfung, Normung, Bezeichnung	16
1.6	Geschichte und Zukunft, Nachhaltigkeit	18
1.7	Fragen zur Erfolgskontrolle	22
	Literatur	22
 Teil I Aufbau der Werkstoffe		
2	Aufbau fester Phasen	27
2.1	Atome	28
2.2	Bindung der Atome und Moleküle	33
2.3	Kristalle	44
2.4	Baufehler	53
2.5	Korngrenzen und homogene Gefüge	61
2.6	Gläser und Quasikristalle	65
2.7	Fragen zur Erfolgskontrolle	69
	Literatur	69
3	Aufbau mehrphasiger Stoffe	71
3.1	Mischphasen und Phasengemische	71
3.2	Heterogene Gleichgewichte	77
3.3	Keimbildung, Kristallisation von Schmelzen	92
3.4	Metastabile Gleichgewichte	96
3.5	Anwendungen von Phasendiagrammen	99
3.6	Fragen zur Erfolgskontrolle	101
	Literatur	101

4	Grundlagen der Wärmebehandlung	103
4.1	Diffusion	104
4.2	Kristallerholung und Rekristallisation	114
4.3	Glasbildung	121
4.4	Umwandlungen und Ausscheidung	122
4.5	Thermische Stabilität von Mikrostrukturen	128
4.6	Martensitische Umwandlung	131
4.7	Heterogene Gefüge	135
4.8	Nanostrukturen	138
4.9	Fragen zur Erfolgskontrolle	141
	Literatur	142
Teil II Eigenschaften der Werkstoffe		
5	Mechanische Eigenschaften	147
5.1	Mechanische Beanspruchung und Elastizität	148
5.2	Zugversuch und Kristallplastizität	155
5.2.1	Makroskopische Betrachtung der Plastizität	155
5.2.2	Mikroskopische Betrachtung der Plastizität	159
5.3	Kriechen	167
5.4	Bruch	174
5.4.1	Mikroskopische und makroskopische Aspekte	174
5.4.2	Bruchmechanik, statische Belastung und Anriss	178
5.4.3	Ermüdung	181
5.5	Innere Spannungen	188
5.6	Gummielastizität	190
5.7	Viskosität von Flüssigkeiten und Gläsern	191
5.8	Viskoelastizität und Dämpfung	195
5.9	Mehrachsiges Beanspruchung, mechanische Anisotropie	197
5.10	Technische Prüfverfahren	202
5.11	Fragen zur Erfolgskontrolle	207
	Literatur	208
6	Physikalische Eigenschaften	211
6.1	Kernphysikalische Eigenschaften	212
6.2	Elektrische Eigenschaften, Werkstoffe der Elektro- und Energietechnik	221
6.3	Wärmeleitfähigkeit	236
6.4	Ferromagnetische Eigenschaften, weich- und hartmagnetische Werkstoffe	237
6.5	Supraleiter	244
6.6	Optische Eigenschaften	246

6.7	Thermische Ausdehnung	249
6.8	Formgedächtnis, Sensor- und Aktorwerkstoffe	252
6.9	Fragen zur Erfolgskontrolle	258
	Literatur	259
7	Chemische und tribologische Eigenschaften	261
7.1	Oberflächen und Versagen des Werkstoffs	261
7.2	Oberflächenreaktionen und elektrochemische Korrosion	263
7.3	Verzundern	271
7.4	Spannungsrissskorrosion	273
7.5	Oberflächen, Grenzflächen und Adhäsion	275
7.6	Reibung und Verschleiß	279
7.7	Fragen zur Erfolgskontrolle	286
	Literatur	286
 Teil III Die vier Werkstoffgruppen		
8	Keramische Werkstoffe	291
8.1	Allgemeine Kennzeichnung	292
8.2	Einatomare keramische Stoffe	294
8.3	Nichtoxidische Verbindungen	296
8.4	Kristalline Oxidkeramik	300
8.5	Anorganische nichtmetallische Gläser	305
8.6	Hydratisierte Silikate, Zement, Beton	311
8.7	Fragen zur Erfolgskontrolle	317
	Literatur	317
9	Metallische Werkstoffe	319
9.1	Allgemeine Kennzeichnung	320
9.2	Reine Metalle, elektrische Leiter	321
9.3	Mischkristalle, Messing, Bronzen	324
9.4	Ausscheidungshärtung, Al-, Ni-Legierungen	332
9.5	Umwandlungshärtung, Stähle	341
9.6	Gusslegierungen und metallische Gläser	361
9.7	Fragen zur Erfolgskontrolle	369
	Literatur	369
10	Polymerwerkstoffe	371
10.1	Allgemeine Kennzeichnung	372
10.2	Plastomere oder Thermoplaste	381
10.3	Duromere oder Kunstharze	389
10.4	Elastomere oder Gummi	392
10.5	Schaum-, Hochtemperatur-, Piezopolymere	395

10.6	Schmierstoffe	404
10.7	Natürliche Polymere	406
10.8	Fragen zur Erfolgskontrolle	410
	Literatur	410
11	Verbundwerkstoffe	413
11.1	Eigenschaften von Phasengemischen	414
11.2	Faserverstärkte Werkstoffe	419
11.3	Stahlbeton und Spannbeton	427
11.4	Hartmetalle und Cermets	429
11.5	Oberflächenbehandlung	434
11.6	Holz, nachwachsende, zelluläre Werkstoffe	439
11.7	Fragen zur Erfolgskontrolle	444
	Literatur	444
Teil IV Werkstofftechnik		
12	Werkstoff und Fertigung	449
12.1	Halbzeug und Bauteil	450
12.2	Urformen: Gießen, Sintern, Aufdampfen, komplexe Systeme	452
12.3	Umformen	465
12.4	Trennen: Spanen und Schleifen	474
12.5	Fügen: Schweißen, Löten, Kleben	477
12.6	Nachbehandlung	483
12.7	Fragen zur Erfolgskontrolle	485
	Literatur	485
13	Der Kreislauf der Werkstoffe	487
13.1	Vom Rohstoff zum Schrott	488
13.2	Auswahl und Gebrauch	496
13.3	Verbesserte und neue Werkstoffe	502
13.4	Versagen und Sicherheit	503
13.5	Entropieeffizienz und Nachhaltigkeit	511
13.6	Fragen zur Erfolgskontrolle	515
	Literatur	517
A	Anhang	519
	Stichwortverzeichnis	537