

---

# Springer-Lehrbuch

---

Hans-Jürgen Bargel • Günter Schulze<sup>†</sup>  
(Hrsg.)

# Werkstoffkunde

12., bearbeitete Auflage,  
korrigierter Nachdruck

*Herausgeber*  
Prof. Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Bargel  
Berlin  
Deutschland

ISSN 0937-7433  
Springer-Lehrbuch  
ISBN 978-3-662-48628-3      ISBN 978-3-662-48629-0 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-48629-0>

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 2018

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 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 12. Auflage

Mit der Neubearbeitung dieser Auflage wurden in mehreren Kapiteln Strukturen und Inhalte so aufbereitet, dass der rote Faden für ein Lernen konsequenter eingehalten wird. Damit wird der Charakter als Lehrbuch gestärkt, denn schließlich soll dieses Buch primär Studierenden technischer Disziplinen, wie Maschinenbau, Mechatronik, Verfahrens- oder Elektrotechnik, als ein Grundlagenwerk dienen. Darüber hinaus sind neuere Entwicklungen in der Werkstofftechnik insbesondere von Bedeutung für tätige Ingenieure, die das Buch auch zur Unterstützung ihrer Arbeit nutzen.

Veränderungen gegenüber der letzten Auflage betreffen vor allem die Kap. 1 bis 4. Erwähnenswert sind dabei:

- Neustrukturierung der „Grundlagen der Legierungsbildung“ in Kap. 1,
- Ergänzungen zur Schwingprüfung, insbesondere für den Bereich sehr großer Schwingungszahlen (VHCF = very high cycle fatigue) betreffend, und zur Härteprüfung in Kap. 3 sowie
- weitgehende Neubearbeitung des Abschnitts „Wärmebehandlung der Stähle“ in Kap. 4.

Die Aufrechterhaltung der Aktualität eines Fachbuchs erfordert von Autoren, Herausgeber und Verlag immer einen Kompromiss zwischen dem, was an Neuerungen zu berücksichtigen wäre, und der Beibehaltung eines sinnvollen Umfangs des Werks. Insofern muss um Verständnis gebeten werden, wenn nicht alle Werkstoffspezialitäten so ausführlich berücksichtigt sind, wie es vielleicht Studierende der Werkstofftechnik oder gar Werkstoffwissenschaftler erwarten. Autoren und Herausgeber danken jedoch allen Nutzern der „Werkstoffkunde“ für die gegebenen Hinweise.

Berlin  
im März 2018

Hans-Jürgen Bargel

---

# Vorwort zur 1. Auflage

Die Neuerscheinung „Werkstoffkunde“ soll die bestehende Lücke zwischen stark praxisorientierten Lehrbüchern und den theorieorientierten Lehrbüchern der Werkstoffwissenschaft schließen. Das Buch richtet sich hauptsächlich an Ingenieure und Studenten der Fachrichtungen Maschinenbau und Elektrotechnik.

## **Stoffauswahl**

Die Werkstoffkunde stellt eine Brücke her zwischen der Werkstoffwissenschaft und der praktischen Anwendung der Werkstoffe. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse gelangen nur zögernd in die Praxis, weil die einschlägige Literatur oft nur dem Werkstofffachmann verständlich ist. Andererseits enthalten die für die Praktiker geschriebenen Lehrbücher häufig eine Vielzahl von Einzelercheinungen, die scheinbar zusammenhanglos nebeneinander stehen. Es wird deshalb leider oft behauptet, die Werkstoffkunde sei ein Fachgebiet, deren Fakten nur auswendig zu lernen seien.

Ziel dieses Buches ist es, die Erkenntnisse der Werkstoffwissenschaft in vereinfachter Form und deren Bezug zur Praxis darzustellen. Damit wird sowohl dem Studenten als auch dem in der Praxis tätigen Ingenieur die Möglichkeit gegeben, das Verhalten von Werkstoffen zu verstehen. Die Autoren waren bemüht, immer wieder zu zeigen, dass wenige grundlegende Tatsachen und Vorgänge im Werkstoff die Eigenschaften bestimmen. Natürlich ist ein derartiges Vorhaben nicht mit letzter Konsequenz durchführbar. Der begrenzte Umfang des Buches erzwingt Beschränkungen in der Darstellung wissenschaftlicher Erkenntnisse und in der Beschreibung singulärer Erscheinungen.

## **Zum Inhalt**

Der Inhalt einzelner Kapitel unterscheidet sich in verschiedenen Punkten von vergleichbaren Werken. So wurde die Korrosion von Metallen in die Grundlagen der Metall- und Legierungskunde einbezogen, um der allgemeinen Bedeutung dieses Problems gerecht zu werden.

Von einer ausgedehnten Darstellung der Verfahren der Werkstoffherstellung wurde abgesehen. Die Autoren waren der Auffassung, dass Ingenieure des Maschinenbaus und der Elektronik nur selten auf Herstellungsprozesse einwirken. Dagegen ist es für eine sinnvolle Auswahl von Werkstoffen unumgänglich zu wissen, wie die Herstellverfahren die Werkstoffeigenschaften beeinflussen.

In gleicher Art wurde auf das Beschreiben von Fertigungsverfahren völlig verzichtet und nur die grundsätzlich mögliche Einwirkung der Weiterverarbeitung auf Werkstoffeigenschaften erläutert. Damit erfolgte eine eindeutige Abgrenzung zum Fachgebiet Fertigungstechnik.

Demgegenüber wurde den werkstofflichen Fragen auf dem Gebiet der Schweißtechnik breiter Raum gewidmet, wodurch sich das Buch ebenfalls von vergleichbaren Werken abhebt. Die ständig zunehmende Bedeutung des Schweißens in der Fertigungstechnik erfordert von jedem Ingenieur grundlegende Kenntnisse über das Verhalten der Werkstoffe.

Wenn der Titel des Buches nicht Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung lautet, so deshalb, weil das entsprechende Kapitel kein Lehrbuch für das Prüfen von Werkstoffen ersetzen soll. Die Definition von Werkstoffkennwerten, ihre technische Bedeutung und ihre Veränderung infolge abweichender Prüfbedingungen haben hier eindeutigen Vorrang vor dem Beschreiben von Verfahren, Geräten und Messmethoden. Auf das *Bruchverhalten metallischer Werkstoffe* wird dagegen wegen der Bedeutung der Zähigkeitseigenschaften für die Sicherheit von Konstruktionen gesondert eingegangen.

Bei den Eisenwerkstoffen steht neben der *Wärmebehandlung* vor allem wieder die *Schweißneigung von Stählen* im Vordergrund. Soweit die einzelnen Sorten in den DIN-Normen aufgeführt sind, wurde auf tabellarische Darstellungen weitestgehend verzichtet, aufgeführt werden dagegen z. B. die *Feinkorn-Sonderbaustähle*.

Die Nichteisenmetalle zeichnen sich häufig durch besondere Korrosionsbeständigkeit, Temperaturbeständigkeit, elektrische Leitfähigkeit etc. aus, wogegen die statische Festigkeit in den Hintergrund treten kann. Die Beschreibung der NE-Metalle konzentriert sich deshalb auf diese Sondereigenschaften, wobei insbesondere auch die *Belange der Elektrotechnik* berücksichtigt werden.

Auch die nichtmetallischen anorganischen Werkstoffe werden vorzugsweise im Hinblick auf ihre *Einsatzfähigkeit in der Elektrotechnik* dargestellt. Allerdings kann im Rahmen dieses Buches dieser Anwendungsbereich nur exemplarisch behandelt werden. Ein zweites Einsatzfeld nichtmetallischer anorganischer Werkstoffe ist das der Verbundwerkstoffe.

Die Bedeutung, die die Kunststoffe in allen Bereichen der Technik gewonnen haben, erfordert eine ausführliche Behandlung dieser Werkstoffgruppe. Die *Unterschiede gegenüber den Metallen* werden herausgestellt und – soweit es der gesetzte Rahmen des Buches zulässt – jene Fragenkomplexe erörtert, deren Klärung erst ein echtes *Verständnis der Verhaltensweise der verschiedenen Kunststoffe* ermöglicht. Dazu zählen auch die Vorgänge und Auswirkungen der chemischen und technischen Prozesse der Herstellung.

Das abschließende kurze Kapitel über Schadenfälle soll zeigen, dass es vermeidbare und unvermeidbare „Werkstofffehler“ gibt. Es vermittelt zudem einen Einblick in die *Systematik einer Schadensanalyse*.

### **Hinweise für den Benutzer**

Die in den Text eingefügten Querverweise dienen dem Aufzeigen von Zusammenhängen und der Verbindung von Einzelinformationen. *Kursiv* gedruckte Wörter sind häufig Stichwörter, **halbfett** gedruckte sind es in der Regel. Das

umfangreiche *Stichwortverzeichnis* erleichtert den Zugang zu Einzelfragen. Es sollte aber auch genutzt werden, um die unter demselben oder ähnlichen Stichwörtern an verschiedenen Stellen des Buches zu findenden Informationen zu verknüpfen.

*Literaturhinweise* am Ende eines jeden Kapitels sollen eine Ergänzung und Vertiefung des Stoffes dieses Buches ermöglichen.

Wir danken Herrn *Prof. Dr. Appel*, Wilhelmshaven, und Herrn *Prof. Fink*, Frankfurt, für die vielen Anregungen und Diskussionsbeiträge. Besonderer Dank gebührt Frau *Regina Reichelt*, Berlin, für die Anfertigung der Zeichnungen und Frau *Jutta Fritz*, Berlin, für die Ausführung vieler Fotoarbeiten. Den Mitarbeitern des Schroedel-Verlages danken wir für ihre Initiative und die gewährte Unterstützung. Herrn Dipl.-Ing. *Roland Werner* von der Verlagsredaktion sind wir besonders dankbar für viele Anregungen und die sehr gute Zusammenarbeit. Weiterhin danken wir Herrn *Prof. Dipl.-Ing. Schlinke* (HTL Mödling) für zahlreiche Anregungen und Verbesserungsvorschläge.

Anregungen und Kritik unserer Leser sehen wir mit Interesse entgegen.

Berlin  
im Herbst 1978

Hans-Jürgen Bargel  
Günter Schulze

---

# Inhaltverzeichnis

<b>1 Grundlagen der Metall- und Legierungskunde .....</b>	<b>1</b>
Hans-Jürgen Bargel und Günter Schulze	
1.1 Aufbau kristalliner Stoffe.....	1
1.1.1 Bindungsformen anorganischer Stoffe .....	1
1.1.2 Gitteraufbau des Idealkristalls .....	2
1.1.3 Realkristalle, Gitterbaufehler, Energie von Fehlstellen .....	6
1.1.4 Einkristall, Vielkristall .....	11
1.2 Eigenschaften der Metalle .....	13
1.2.1 Elektrische und thermische Eigenschaften .....	13
1.2.2 Mechanische Eigenschaften .....	16
1.3 Phasenumwandlungen.....	23
1.3.1 Primärkristallisation bei reinen Metallen .....	23
1.3.2 Primärkristallisation bei Legierungen .....	26
1.3.3 Einfluss der Korngrenzen.....	28
1.3.4 Umwandlungen im festen Zustand.....	29
1.3.5 Martensitbildung.....	30
1.4 Thermisch aktivierte Vorgänge .....	32
1.4.1 Diffusion .....	32
1.4.2 Kristallerholung und Rekristallisation.....	34
1.4.3 Kriechen und Spannungsrelaxation .....	38
1.5 Grundlagen der Legierungsbildung .....	39
1.5.1 Begriffe, Definitionen .....	40
1.5.2 Phasengesetz .....	40
1.5.3 Mischkristalle .....	41
1.5.4 Intermediäre Kristalle.....	43
1.5.5 Zustandsschaubilder.....	44
1.6 Zustandsschaubilder von Zweistofflegierungen .....	47
1.6.1 Vollkommene Unlöslichkeit im flüssigen und festen Zustand.....	47
1.6.2 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand.....	47
1.6.3 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand, vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand .....	49
1.6.4 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand, begrenzte Löslichkeit im festen Zustand.....	51



1.6.5	Zustandsschaubilder mit intermediären Phasen .....	55
1.6.6	Zustandsschaubilder mit Umwandlungen im festen Zustand .....	56
1.6.7	Nichtgleichgewichtszustände .....	57
1.7	Eigenschaften technischer Legierungen – Anwendungen der Zustandsschaubilder .....	59
1.7.1	Eigenschaften von Legierungen aus Kristallgemengen .....	59
1.7.2	Eigenschaften von Legierungen aus Mischkristallen .....	60
1.7.3	Eigenschaften von Legierungen mit Umwandlungen im festen Zustand .....	62
1.8	Korrosion .....	65
1.8.1	Elektrochemische Grundlagen .....	66
1.8.2	Korrosionsformen .....	71
1.8.3	Korrosionsarten .....	72
1.8.4	Korrosionsverhalten der Werkstoffe .....	75
1.8.5	Korrosionsschutz .....	76
1.8.6	Korrosionsprüfungen .....	77
1.9	Fragen und Aufgaben zu Kap. 1 .....	78
	Literatur .....	79
<b>2</b>	<b>Einwirkung von Herstellung und Weiterverarbeitung auf die Eigenschaften von Metallen .....</b>	<b>81</b>
	Hans-Jürgen Bargel und Günter Schulze	
2.1	Metallgewinnung, Verhüttung .....	81
2.1.1	Erze, Anreicherungsverfahren .....	81
2.1.2	Verhüttung, Reduktion .....	82
2.1.3	Raffination .....	82
2.1.4	Nichtmetallische Verunreinigungen .....	83
2.1.5	Gase im Metall .....	84
2.2	Schmelzen und Erstarren .....	85
2.2.1	Primärkristallisation in Gusskonstruktionen .....	85
2.2.2	Kristallisation in Schweißverbindungen .....	86
2.2.3	Gerichtete Erstarrung .....	87
2.2.4	Seigerungen .....	87
2.2.5	Lunker .....	88
2.2.6	Einfluss des Gießverfahrens .....	88
2.3	Umformen .....	90
2.3.1	Warmformgebung .....	91
2.3.2	Kaltformgebung .....	94
2.4	Sintern (Pulvermetallurgie) .....	95
2.4.1	Pulverherstellung, Sintervorgang .....	96
2.4.2	Möglichkeiten und Eigenschaften von Sinterwerkstoffen .....	96
2.5	Schweißen .....	97
2.5.1	Thermische Wirkung .....	98

2.5.2	Aufbau und Eigenschaften der thermisch beeinflussten Bereiche.....	99
2.5.3	Werkstoffbedingte Besonderheiten und Schwierigkeiten beim Schweißen .....	100
2.6	Löten .....	104
2.7	Wärmebehandlung.....	108
2.7.1	Ziel der Wärmebehandlung.....	108
2.7.2	Temperaturführung.....	109
2.7.3	Glühbehandlungen (gleichgewichtsnahen Zustände)....	110
2.7.4	Härten.....	111
2.8	Eigenspannungen .....	112
2.8.1	Eigenspannungen infolge Kaltverformung.....	113
2.8.2	Eigenspannungen infolge schneller Abkühlung.....	113
2.8.3	Schweißereigenspannungen.....	114
2.8.4	Nachweis und Abbau von Eigenspannungen.....	115
2.9	Fragen und Aufgaben zu Kapitel 2 .....	115
	Literatur.....	116
	Nützliche Links .....	116
<b>3</b>	<b>Werkstoffprüfung .....</b>	<b>117</b>
	Hans-Jürgen Bargel	
3.1	Statische Festigkeits- und Verformungskennwerte.....	117
3.1.1	Spannung-Verformung-Verlauf.....	117
3.1.2	Elastische Kennwerte.....	119
3.1.3	Kennwerte des Zugversuchs.....	121
3.1.4	Kennwerte des Druckversuchs .....	124
3.1.5	Biegeversuch und Verdrehversuch .....	125
3.1.6	Zeitstandversuch .....	126
3.1.7	Einflussfaktoren.....	127
3.2	Festigkeits- und Verformungskennwerte bei schwingender Beanspruchung.....	131
3.2.1	Definitionen.....	131
3.2.2	Prüfverfahren.....	135
3.2.3	Einflüsse auf die Schwingfestigkeit.....	136
3.2.4	Werkstoffverhalten bei schwingender Beanspruchung .....	140
3.3	Härtekennwerte.....	143
3.3.1	Begriffe .....	143
3.3.2	Statische Härteprüfverfahren .....	144
3.3.3	Dynamische Härteprüfverfahren .....	147
3.3.4	Einflüsse auf die Härtewerte.....	148
3.4	Kennwerte des Bruchverhaltens.....	148
3.4.1	Bruchformen .....	149
3.4.2	Bruchkriterien, Grundlagen der Bruchmechanik.....	152
3.4.3	Verfahren zur Prüfung des Zähigkeitsverhaltens.....	155
3.4.4	Einflüsse auf das Bruchverhalten.....	159
3.4.5	Anwendungsgrenzen von Bruchversuchen.....	161

3.5	Technologische Prüfverfahren.....	161
3.5.1	Prüfung der Umformeigenschaften.....	162
3.5.2	Prüfung der Gießeigenschaften.....	163
3.5.3	Weitere technologische Prüfungen.....	164
3.6	Zerstörungsfreie Prüfung .....	164
3.6.1	Kapillarverfahren.....	165
3.6.2	Magnetische und induktive Verfahren.....	165
3.6.3	Schallverfahren.....	166
3.6.4	Strahlenverfahren .....	167
3.7	Metallografische Untersuchungsverfahren.....	167
3.7.1	Makroskopische Verfahren .....	168
3.7.2	Mikroskopische Verfahren.....	168
3.8	Physikalische Analyseverfahren.....	171
3.8.1	Spektralanalyse .....	171
3.8.2	Röntgenfeinstrukturuntersuchung .....	172
3.9	Fragen und Aufgaben zu Kap. 3 .....	172
	Literatur.....	173
	Nützliche Links .....	173
<b>4</b>	<b>Eisenwerkstoffe .....</b>	<b>175</b>
	Günter Schulze und Hans-Jürgen Bargel	
4.1	Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS).....	175
4.1.1	Metallkundliche Grundlagen.....	175
4.1.2	Phasenänderungen im Eisen-Kohlenstoff- Schaubild (EKS) .....	176
4.2	Einteilung der Eisenwerkstoffe .....	181
4.3	Stahlherstellung .....	181
4.3.1	Hochofenerzeugnisse .....	181
4.3.2	Erschmelzungsverfahren .....	182
4.3.3	Sekundärmetallurgie (Pfannenmetallurgie).....	184
4.3.4	Weitere Verarbeitung von Stahl .....	185
4.4	Wirkung der Eisenbegleiter.....	188
4.4.1	Mangan.....	188
4.4.2	Silicium .....	189
4.4.3	Phosphor.....	189
4.4.4	Schwefel .....	189
4.4.5	Stickstoff.....	190
4.4.6	Wasserstoff.....	191
4.4.7	Sauerstoff .....	192
4.4.8	Nichtmetallische Einschlüsse .....	192
4.5	Wärmebehandlung der Stähle .....	193
4.5.1	Austenitisieren .....	193
4.5.2	Umwandlungen bei Abkühlung .....	196
4.5.3	Glühbehandlungen von Stahl .....	206
4.5.4	Härten, Härteverfahren .....	209
4.5.5	Vergüten.....	215
4.5.6	Verfahren zum Härten von Randzonen .....	219
4.5.7	Wärmebehandlungsfehler .....	227

4.6	Legierungselemente im Stahl.....	228
4.6.1	Einteilung und allgemeine Wirkung.....	229
4.6.2	Austenitumwandlung, Darstellung im ZTU-Schaubild .....	232
4.6.3	Härtbarkeit und Härteverhalten legierter Stähle .....	233
4.7	Normgerechte Bezeichnung der Eisenwerkstoffe .....	235
4.7.1	Benennung nach DIN EN 10027-1 .....	235
4.7.2	Kennzeichnung durch Werkstoffnummern (DIN EN 10027-2).....	239
4.8	Stahlgruppen .....	239
4.8.1	Einteilung der Stähle .....	239
4.8.2	Schweißgeeignete Baustähle .....	240
4.8.3	Härtbare Maschinenbaustähle.....	252
4.8.4	Warmfeste und hitzebeständige Stähle.....	261
4.8.5	Kaltzähe Stähle.....	266
4.8.6	Nichtrostende Stähle.....	266
4.8.7	Druckwasserstoffbeständige Stähle.....	279
4.8.8	Werkzeugstähle.....	280
4.9	Eisengusswerkstoffe.....	284
4.9.1	Begriff, Bedeutung, Einteilung .....	284
4.9.2	Stahlguss .....	287
4.9.3	Gusseisen – Übersicht .....	290
4.9.4	Hartguss .....	291
4.9.5	Graues Gusseisen.....	292
4.9.6	Temperguss .....	302
4.10	Fragen und Aufgaben zu Kap. 4.....	305
	Literatur.....	307
	Nützliche Links .....	307
<b>5</b>	<b>Nichteisenmetalle</b> .....	<b>309</b>
	Hermann Hilbrans	
5.1	Normgerechte Bezeichnung der Nichteisenmetalle .....	309
5.1.1	Kurzzeichen.....	310
5.1.2	Werkstoffnummern .....	312
5.2	Kupfer und Kupferlegierungen.....	312
5.2.1	Kupferherstellung.....	313
5.2.2	Unlegiertes Kupfer .....	313
5.2.3	Niedriglegiertes Kupfer.....	316
5.2.4	Kupfer-Zink-Legierungen.....	317
5.2.5	Kupfer-Zink-Nickel-Legierungen.....	318
5.2.6	Kupfer-Zinn-Legierungen.....	319
5.2.7	Kupfer-Nickel-Werkstoffe mit besonderen elektrischen Eigenschaften.....	321
5.2.8	Korrosionsbeständige Kupfer-Nickel-Legierungen ....	322
5.3	Nickel und Nickellegierungen .....	323
5.3.1	Reinnickel.....	323
5.3.2	Legiertes Nickel.....	325
5.3.3	Nickel-Kupfer-Werkstoffe.....	325

5.3.4	Hochwarmfeste und hitzebeständige Nickellegierungen .....	326
5.3.5	Korrosionsbeständige Nickellegierungen.....	329
5.3.6	Nickelhaltige Magnetwerkstoffe .....	330
5.4	Aluminium und Aluminiumlegierungen .....	332
5.4.1	Unlegiertes Aluminium .....	333
5.4.2	Legierungssysteme des Aluminiums .....	334
5.4.3	Wärmebehandlung und Aushärten.....	336
5.4.4	Aluminium-Knetlegierungen .....	337
5.4.5	Aluminium-Gusslegierungen .....	338
5.4.6	Verarbeitung von Aluminiumlegierungen .....	339
5.5	Magnesium und Magnesiumlegierungen .....	340
5.5.1	Reinmagnesium.....	341
5.5.2	Magnesiumlegierungen .....	341
5.6	Titan und Titanlegierungen .....	343
5.6.1	Unlegiertes Titan.....	343
5.6.2	Titanlegierungen .....	344
5.7	Zirkonium und Reaktorwerkstoffe .....	346
5.8	Zinn und Zinnlegierungen.....	347
5.8.1	Reinzinn .....	347
5.8.2	Zinnlegierungen.....	348
5.9	Zink und Zinklegierungen.....	349
5.9.1	Unlegiertes und niedriglegiertes Zink .....	349
5.9.2	Zink-Überzüge .....	350
5.9.3	Zink-Druckguss .....	351
5.10	Blei und Bleilegierungen.....	351
5.10.1	Weichblei .....	352
5.10.2	Bleilegierungen .....	352
5.11	Recycling metallischer Werkstoffe .....	353
5.12	Fragen und Aufgaben zu Kap. 5.....	354
	Literatur.....	355
	Nützliche Links .....	355
<b>6</b>	<b>Anorganische nichtmetallische Werkstoffe.....</b>	<b>357</b>
	Karl-Heinz Hübner	
6.1	Einteilung, Definition, Bedeutung.....	357
6.2	Glas.....	359
6.3	Keramik.....	363
6.3.1	Tonkeramische Werkstoffe .....	364
6.3.2	Oxidkeramische Werkstoffe.....	367
6.3.3	Ferroelektrische keramische Werkstoffe.....	370
6.3.4	Magnetische keramische Werkstoffe .....	372
6.4	Kohlewerkstoffe .....	373
6.5	Nichtoxidische Hartstoffe .....	376
6.5.1	Nichtmetallische Hartstoffe.....	377
6.5.2	Hartstoffe mit metallischen Eigenschaften.....	378
6.6	Halbleiter .....	381

6.6.1	Einleitung.....	381
6.6.2	Bändermodell.....	382
6.6.3	Eigenleitung.....	383
6.6.4	Störstellenleitung.....	384
6.6.5	p-n-Übergang.....	387
6.6.6	Transistor.....	388
6.6.7	Hall-Generator.....	389
6.6.8	Fotoelektrische Bauelemente.....	390
6.7	Nanotechnologie und Nanomaterialien.....	392
6.8	Fragen und Aufgaben zu Kapitel 6.....	394
	Literatur.....	395
<b>7</b>	<b>Kunststoffe.....</b>	<b>397</b>
	Oswald Krüger	
7.1	Einteilung und Aufbau der Kunststoffe.....	397
7.1.1	Bezeichnungen, Begriffe.....	397
7.1.2	Eingruppierung der Kunststoffe.....	398
7.1.3	Vorprodukte, Formstoffe, Zusatzstoffe.....	399
7.1.4	Normung.....	401
7.2	Herstellung.....	402
7.2.1	Chemische Grundlagen.....	402
7.2.2	Polymerisation.....	409
7.2.3	Polykondensation.....	416
7.2.4	Polyaddition.....	420
7.3	Aufbau und strukturelle Einflüsse.....	423
7.3.1	Aufbauformen.....	423
7.3.2	Strukturelle Einflüsse.....	427
7.4	Kunststoffsorten.....	429
7.4.1	Thermoplaste.....	429
7.4.2	Thermoplastische Elastomere (TPE).....	439
7.4.3	Elastomere.....	439
7.4.4	Duroplaste.....	440
7.5	Temperaturabhängige Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten.....	443
7.5.1	Thermische Zustands- und Übergangsbereiche.....	444
7.5.2	Temperaturabhängigkeit.....	446
7.5.3	Formgebungsmöglichkeiten.....	448
7.5.4	Verhalten im Gebrauchszustand.....	451
7.6	Modifizierung von Kunststoffen.....	452
7.6.1	Strukturveränderungen.....	452
7.6.2	Weichmachung.....	454
7.6.3	Additive.....	454
7.6.4	Füllstoffe.....	455
7.6.5	Verstärkungsstoffe.....	456
7.7	Gemeinsame Eigenschaften, charakteristische Merkmale ....	457
7.7.1	Äußere Merkmale.....	457
7.7.2	Chemische und physikalische Eigenschaften.....	458

7.7.3	Mechanische Eigenschaften.....	459
7.7.4	Elektrische Eigenschaften.....	463
7.8	Bestimmung von Kunststoffen.....	465
7.9	Kunststoffprüfung.....	468
7.9.1	Mechanische Eigenschaften.....	468
7.9.2	Mechanisch-thermisches Verhalten.....	477
7.9.3	Elektrische Eigenschaften.....	479
7.10	Kriterien zur Kunststoffauswahl.....	482
7.10.1	Allgemeine Anforderungen.....	482
7.10.2	Eigenschaftskennwerte.....	483
7.11	Fragen und Aufgaben zu Kap. 7.....	483
	Literatur.....	484
<b>8</b>	<b>Schadensanalyse.....</b>	<b>485</b>
	Hans-Jürgen Bargel	
8.1	Methodik einer Schadensanalyse.....	487
8.1.1	Voruntersuchungsphase.....	487
8.1.2	Entscheidungsphase.....	488
8.1.3	Untersuchungsphase.....	488
8.1.4	Auswertungsphase.....	488
8.2	Schadensuntersuchungen.....	489
8.3	Verschleißschäden.....	489
8.3.1	Verschleißsystem.....	490
8.3.2	Verschleißarten.....	491
8.3.3	Verschleißmechanismen.....	491
8.3.4	Verschleißmerkmale.....	492
8.4	Korrosionsschäden.....	493
8.5	Wasserstoffversprödung.....	493
8.6	Fraktografie.....	496
8.7	Beispiele von Schadenfällen.....	498
8.7.1	Wasserschaden durch undichten Rohrentlüfter.....	498
8.7.2	Bruch eines Auslassventils.....	500
8.7.3	Bruch der Kurbelwelle eines Dieselmotors.....	501
8.7.4	Lochkorrosion in einem Wärmeübertrager.....	502
8.7.5	Bruch von Federringen infolge Wasserstoffversprödung.....	503
8.8	Fragen und Aufgaben zu Kap. 8.....	503
	Literatur.....	504
	Nützliche Links.....	504
	<b>Lösungen zu den Übungsaufgaben.....</b>	<b>505</b>
	<b>Sachverzeichnis.....</b>	<b>517</b>

---

## Autorenverzeichnis

**Prof. Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Bargel** Berlin

E-Mail: prof.bargel@web.de

**Dr.-Ing. Hermann Hilbrans<sup>†</sup>** Langenfeld (Rheinland)

**Prof. Dr. rer. nat. Karl-Heinz Hübner** Frankfurt am Main

**Dr.-Ing. Oswald Krüger** Kleinmachnow

**Prof. Dr.-Ing. Günter Schulze<sup>†</sup>**



---

# Symbole und Abkürzungen

---

## Häufige Symbole

$A$	Dehnung, Bruchdehnung
$c$	Konzentration
$d$	Korndurchmesser
$D$	Diffusionskoeffizient
$D_0$	Diffusionskonstante
$e$	(Extensometer-)Dehnung
$E$	Elastizitätsmodul
$G$	Schubmodul
$k_f$	Formänderungsfestigkeit
$KV$	Kerbschlagarbeit
$K_{Ic}$	Risszähigkeit
$Q_A$	Aktivierungsenergie
$R$	Gaskonstante
$R$	Normalspannung
$R_{eH}$	Streckgrenze
$R_m$	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze
$\vartheta, T$	Temperatur
$T_{Rk}$	Rekristallisationstemperatur
$T_S$	Schmelztemperatur
$Z$	Brucheinschnürung
$\varepsilon$	Dehnung, wahre Dehnung
$\sigma$	Normalspannung, wahre Spannung, Formänderungsfestigkeit
$\tau$	Schubspannung
$\varphi$	wahre Dehnung, Umformgrad

---

## Abkürzungen

Ac, Ar	Umwandlungspunkte von Fe-C-Legierungen beim Erwärmen (c) bzw. Abkühlen (r)
e	Elektron
EKS	Eisen-Kohlenstoff-Schaubild
EMK	Einlagerungsmischkristall
F	Freiheitsgrad

hdP	hexagonales Gitter dichtester Kugelpackung
K	Komponente
kfz	kubisch-flächenzentriert
krz	kubisch-raumzentriert
L	Legierung
Li	Liquidus(-linie)
M, Me	Metall
MK	Mischkristall
$M_s$	Beginn der Martensitbildung (Martensite starting temperature)
$M_f$	Ende der Martensitbildung (Martensite finishing temperature)
P	Phase
REM	Raster-Elektronenmikroskop
S	Schmelze
SMK	Substitutionsmischkristall
So	Solidus(-linie)
V	Verbindung
WEZ	Wärmeeinflusszone
ZTA	Zeit-Temperatur-Austenitisierung(-Schaubild)
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlung(-Schaubild)

## Vergleich von Symbolen

Begriff	Einheit	Symbol		
		üblich	Prüfnormen für Metalle	FKM-Richtlinie
Dehnung	%	$\varepsilon$	$e$ oder $A$	$\varepsilon$
Normalspannung, Nennspannung	MPa	$\sigma$	$R$ oder $\sigma$	$\sigma$ oder S
Wahre Dehnung, Umformgrad	–	$\varphi$	$\varepsilon$	–
Wahre Normalspannung, Formänderungsfestigkeit	MPa	$\sigma_w$ oder $k_f$	$\sigma$	–
Schubspannung, Nennspannung	MPa	$\tau$	–	$\tau$ oder T