
Funktionswerkstoffe

Martin Bäker

Funktionswerkstoffe

Physikalische Grundlagen und Prinzipien

Martin Bäker
Institut für Werkstoffe
TU Braunschweig
Braunschweig, Deutschland

ISBN 978-3-658-02969-2
DOI 10.1007/978-3-658-02970-8

ISBN 978-3-658-02970-8 (eBook)

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 Fachmedien Wiesbaden 2014

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Werkstoffe besitzen vielfältige Funktionen: Sie können elektrischen Strom leiten oder isolieren, Magnetfelder erzeugen oder verstärken, sie können Licht absorbieren, reflektieren oder brechen und vieles andere mehr. Häufig werden Werkstoffe auch in der Konstruktion eingesetzt, wo es ihre Hauptaufgabe ist, mechanische Lasten zu tragen. Werkstoffe, die vor allem diese Anforderung erfüllen sollen, bezeichnet man als *Konstruktionswerkstoffe*. Gerade im Maschinenbau und im Bauingenieurwesen stehen diese Werkstoffe im Vordergrund.

Der Begriff *Funktionswerkstoff* dient der Abgrenzung anderer Werkstoffe von solchen Konstruktionswerkstoffen. Als Funktionswerkstoff kann man jeden Werkstoff bezeichnen, der nicht primär wegen seiner mechanischen Eigenschaften zur Konstruktion eingesetzt wird. Die Grenzen zwischen Funktions- und Konstruktionswerkstoffen sind aber fließend. Beispielsweise ist Kupfer zwar ein besserer elektrischer Leiter als Aluminium, doch wegen seiner deutlich höheren Dichte verwendet man trotzdem häufig Aluminium, wenn ein Kabel sein Eigengewicht tragen muss.

In diesem Lehrbuch werden die wichtigsten Gruppen von Funktionswerkstoffen behandelt. Dabei stehen die optischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften im Vordergrund. Zusätzlich werden auch so genannte »smarte Materialien« wie Formgedächtnislegierungen und Piezokeramiken erläutert, die oft deswegen eingesetzt werden, weil ihre mechanischen Eigenschaften steuerbar sind. Andere Funktionswerkstoffe, beispielsweise solche, die zum Korrosionsschutz oder zur Wärmedämmung eingesetzt werden, werden dagegen nicht behandelt.

Im Vordergrund stehen dabei die grundlegenden physikalischen Prinzipien, aber auch Anwendungsmöglichkeiten für Funktionswerkstoffe werden dargestellt. Nicht erläutert werden dagegen die oft sehr aufwändigen Herstellungsverfahren für Funktionswerkstoffe.

Das Buch ist aus dem Skript zur Vorlesung »Funktionswerkstoffe für Maschinenbauer« hervorgegangen, die ich seit mehr als zehn Jahren an der Technischen Universität Braunschweig halte und die sich an Studierende der Vertiefungsrichtungen »Allgemeiner Maschinenbau« und »Materialwissenschaften« richtet. Das Buch wendet sich vor allem an Studierende in ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen, die die physikalischen Prinzipien verstehen wollen, die den unterschiedlichen Funktionswerkstoffen zu Grunde liegen. Vorkenntnisse im Bereich der Festkörperphysik oder der Quantenmechanik sind nicht erforderlich, da alle benötigten Konzepte innerhalb des Buches eingeführt werden.

Ich danke Professor Rösler, der die Idee zu einer Vorlesung »Funktionswerkstoffe für Maschinenbauer« hatte und der mir die Gelegenheit gab, diese Vorlesung nach meinen Vorstellungen zu konzipieren und ein Skript zur Vorlesung

zu schreiben. Auch meine Kollegen haben, nicht zuletzt durch die immer gute Atmosphäre am Institut, viel zum Entstehen des Buches beigetragen. Ganz besonders möchte ich mich bei den vielen Studierenden bedanken, die mir durch ihre Fragen zur Vorlesung und durch Anmerkungen zum Vorlesungsskript gezeigt haben, an welchen Stellen meine Erklärungen unzureichend oder unverständlich waren, und die darüber hinaus zahlreiche kleinere und größere Fehler gefunden haben. Ein weiterer Dank geht an Harald Harders, der für meine vielen Fragen zum Buchlayout immer ein offenes Ohr hatte und der mir mit einigen L^AT_EX-Tricks weitergeholfen hat. Um die Anwendungsmöglichkeiten von Funktionswerkstoffen besser illustrieren zu können, habe ich an vielen Stellen auf Bildmaterial von Forschungsinstituten und Firmen zurückgegriffen. Ich danke allen, die mir freundlicherweise die Rechte zum Verwenden ihrer Bilder übertragen haben. Frau Klabunde und Herrn Zipsner vom Springer Vieweg-Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit und die Möglichkeit, das Buch in ihrem Verlag herauszubringen. Schließlich danke ich auch meiner Familie für die Unterstützung und das große Verständnis für die zahlreichen Stunden, die ich abends und an den Wochenenden vor dem Computer verbracht habe.

Braunschweig, im Februar 2014

Martin Bäker

Wie man dieses Buch liest

Die einzelnen Kapitel dieses Buchs bestehen meist aus drei Teilen: Zunächst wird die für die jeweilige Werkstoffgruppe interessante Phänomenologie betrachtet, es werden also beispielsweise beobachtbare Experimente beschrieben oder aus dem Alltag bekannte Phänomene erwähnt. Anschließend wird theoretisch erklärt, wie diese Phänomene zu Stande kommen, und abschließend werden Anwendungsbeispiele diskutiert.

Die theoretischen Erläuterungen in den einzelnen Kapiteln gehen zum Teil über das absolut notwendige Maß hinaus. Dies liegt daran, dass insbesondere in den anfänglichen Kapiteln die Grundlagen für die späteren Abschnitte gelegt werden. Beispielsweise enthält das Kapitel über Flüssigkristalle eine relativ ausführliche Erläuterung elektromagnetischer Phänomene, da diese in späteren Kapiteln benötigt werden. Auf diese Weise lässt sich der sonst in Büchern dieser Art verwendete Aufbau umgehen, bei dem zuerst sämtliche Theorie erläutert wird und erst danach die eigentlichen Funktionswerkstoffe diskutiert werden. Um die Übersicht zu erleichtern, werden am Ende jedes Kapitels die wichtigsten in diesem Kapitel eingeführten Schlüsselkonzepte noch einmal aufgeführt. Dieser Abschnitt ist nicht als inhaltliche Zusammenfassung des Kapitels zu verstehen, sondern soll dazu dienen, diejenigen Ideen zu wiederholen, die in anderen Teilen des Buchs benötigt werden. Bevor Sie von einem Kapitel zum nächsten weitergehen, sollten Sie diese Schlüsselkonzepte verstanden haben. Die Tabelle auf Seite XIII gibt einen Überblick über die Schlüsselkonzepte und zeigt, in welchen Kapiteln sie eingeführt und verwendet werden.

Der Haupttext des Buchs enthält häufig Randbemerkungen wie diese hier →. Diese Randbemerkung sollen die Orientierung erleichtern und dafür sorgen, dass der rote Faden nicht verloren geht. Sie können auch als Lernhilfe verwendet werden: Wenn Sie versuchen, alle Randbemerkungen inhaltlich nachzuvollziehen und zu überlegen, was jeweils im Haupttext dazu stehen sollte, können Sie Wissens- und Verständnislücken schnell aufdecken. Die Lektüre der Randbemerkungen allein ist allerdings für das Verständnis nicht ausreichend, zumal in ihnen manche Sachverhalte nur vereinfacht oder verkürzt wiedergegeben sind.

Randbemerkungen helfen (hoffentlich), einen Überblick zu bekommen.

In den Text sind außerdem Übungsaufgaben eingestreut, die meist kleine Rechnungen oder einfache weiterführende Überlegungen enthalten. Da fast nichts frustrierender ist, als sich an einer Übungsaufgabe festzubeißen und am Ende nicht zu wissen, wie man die Aufgabe hätte lösen sollen, finden Sie ausführliche Lösungen am Ende des Buches.

Das Buch enthält neben dem normal gedruckten Haupttext auch Texte, die für ein grundlegendes Verständnis des Stoffes nicht zentral sind. Zum Teil präzisieren diese Abschnitte auch vereinfachte Erklärungen im Hauptteil. Diese Texte sind wie folgt gekennzeichnet:



Vertiefungen der Stufe 1 enthalten Vertiefungen des Haupttextes und weiterführende Erläuterungen. Sie können beim Lesen des Haupttextes mitgelesen oder übersprungen werden, enthalten aber gelegentlich Verweise auf gleichartige Abschnitte weiter vorn im Buch. Sie enthalten keine Vorgriffe auf späteres Material.



Vertiefungen der Stufe 2 enthalten noch weiter vertiefendes Material. Sie enthalten evtl. Rückgriffe auf gleichartige Abschnitte und auch Vorgriffe auf Material des Haupttextes oder auf einfache Vertiefungen späterer Kapitel. Sie sollten deshalb beim ersten Lesen übersprungen werden.



Abschnitte, die so gekennzeichnet sind, enthalten Exkurse, d. h., weiterführende Informationen, die nicht zum besseren Verständnis dienen, sondern Zusatzinformationen enthalten, beispielsweise historische Anmerkungen oder Querverweise auf ähnliche Phänomene in anderen Wissenschaftsdisziplinen. Sie können nach Belieben mitgelesen oder übersprungen werden und enthalten nur Verweise auf den Hauptteil.

In diesem Buch werden wir für einige physikalische Phänomene unterschiedliche Modelle kennenlernen, die diese Phänomene beschreiben. Für Licht gibt es beispielsweise sowohl ein Wellen- als auch ein Teilchenmodell. Jedes dieser Modelle hat einen bestimmten Anwendungsbereich. Um den Überblick über diese Modelle etwas zu erleichtern, werden die wichtigsten Eigenschaften häufig verwendeter Modelle jeweils in so genannten Modellboxen zusammengefasst, siehe zum Beispiel Seite 13.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Wie man dieses Buch liest	VII
Periodensystem der Elemente	XIV
1 Flüssigkristalle	1
1.1 Motivation und Phänomenologie	1
1.2 Was ist ein Flüssigkristall?	2
1.2.1 Phasen und Mesophasen	2
1.2.2 Struktur von Flüssigkristallen	5
1.3 Grundlagen der Optik	6
1.3.1 Elektrische und magnetische Felder	6
1.3.2 Licht als elektromagnetische Welle	11
1.4 Anwendungen	18
1.4.1 Funktionsweise einer Flüssigkristall-Anzeige	18
1.4.2 Ansteuerung der Bildpunkte	22
1.4.3 Flüssigkristall-Thermometer	23
1.5 Schlüsselkonzepte	27
2 Formgedächtnislegierungen	29
2.1 Phänomenologie	29
2.2 Kristallstruktur und Phasenübergänge	31
2.2.1 Kristallstrukturen	31
2.2.2 Das Boltzmann-Gesetz und die Entropie	33
2.2.3 Phasenübergänge	37
2.3 Erläuterung der Formgedächtnis-Effekte	41
2.4 Anwendungen	45
2.5 Schlüsselkonzepte	47
3 Piezoelektrika	49
3.1 Phänomenologie	49
3.2 Elektrische Polarisaton	49
3.3 Atomaufbau und Bindung	52
3.3.1 Das Orbitalmodell	52
3.3.2 Elektronenorbitale in Atomen	55
3.3.3 Dipole in Materie	60
3.4 Elektrische Eigenschaften von Isolatoren	64
3.4.1 Dielektrische Materialien	64

3.4.2	Piezoelektrische Materialien	66
3.4.3	Der Piezomodul	67
3.4.4	Pyroelektrika und Ferroelektrika	70
3.5	Anwendungen	73
3.6	Schlüsselkonzepte	75
4	Optische Werkstoffe (Gläser)	77
4.1	Phänomenologie	77
4.2	Licht und seine Wechselwirkung mit Materie	80
4.2.1	Elektromagnetische Wellen und Atome	80
4.2.2	Lichtbrechung	81
4.2.3	Photonen	85
4.3	Lichtabsorption	88
4.3.1	Lichtabsorption in Atomen und Molekülen	88
4.3.2	Energieniveaus in Festkörpern: Das Bändermodell	89
4.3.3	Weitere Absorptionsphänomene	92
4.3.4	Lichtabsorption in Gläsern	95
4.4	Reflexion	96
4.5	Anwendungen	99
4.6	Schlüsselkonzepte	103
5	Farbstoffe	105
5.1	Was ist eine Farbe?	105
5.2	Farbige Gläser	109
5.3	Organische Farbstoffe	112
5.3.1	Das Kastenpotential	112
5.3.2	Orbitale und Energieniveaus des Kastenpotentials	113
5.3.3	Lichtabsorption in organischen Farbstoffen	118
5.4	Interferenzfarben und photonische Kristalle	121
5.5	Anwendungen	122
5.6	Schlüsselkonzepte	124
6	Elektrische Leiter	125
6.1	Phänomenologie der elektrischen Leitung	125
6.2	Das Drude-Modell	128
6.2.1	Anwendungen des Drude-Modells	132
6.2.2	Probleme des Drude-Modells	133
6.3	Noch einmal das Bändermodell	135
6.4	Das Sommerfeld-Modell	138
6.4.1	Das dreidimensionale Kastenpotential	138
6.4.2	Elektronenorbitale in Metallen	142
6.4.3	Die Wärmekapazität von Metallen	144
6.4.4	Periodische Randbedingungen	146
6.4.5	Elektrische Leitung im Sommerfeld-Modell	150
6.4.6	Probleme des Sommerfeld-Modells	156

6.5	Das Bloch-Modell	157
6.5.1	Einfluss der Ionenrümpfe	157
6.5.2	Reduziertes Zonenschema	161
6.5.3	Bändermodell und Atomorbitale	169
6.6	Schlüsselkonzepte	170
7	Halbleiter	173
7.1	Phänomenologie	173
7.2	Die Bandlücke von Halbleitern	173
7.3	Elektrische Leitung in Halbleitern	175
7.3.1	Ladungsträger	175
7.3.2	Löcherleitung	176
7.3.3	Die effektive Masse und die Beweglichkeit	179
7.4	Halbleiterstrukturen	183
7.4.1	Dotierung von Halbleitern	183
7.4.2	Der p - n -Übergang	186
7.4.3	Der Transistor	193
7.5	Optische Eigenschaften von Halbleitern	198
7.5.1	Lichtabsorption	198
7.5.2	Photodioden	199
7.5.3	Solarzellen	201
7.6	Schlüsselkonzepte	202
8	Materialien für Lichtquellen	205
8.1	Theorie der Emission	205
8.2	Thermische Lichtquellen	207
8.2.1	Strahlung schwarzer Körper	208
8.2.2	Künstliche thermische Lichtquellen	211
8.3	Gasentladungslampen	212
8.4	Leuchtdioden	214
8.5	Laser	215
8.5.1	Photonen und das Laserprinzip	215
8.5.2	Lasertypen und ihre Anwendungen	220
8.6	Schlüsselkonzepte	224
9	Supraleiter	227
9.1	Phänomenologie	227
9.2	Theorie der Supraleitung	229
9.2.1	Cooper-Paare	230
9.2.2	Bosonen und Fermionen	234
9.2.3	Der supraleitende Zustand	236
9.3	Hochtemperatur-Supraleiter	237
9.4	Anwendungen	238
9.5	Schlüsselkonzepte	239

10 Magnetische Werkstoffe	241
10.1 Magnetische Felder	241
10.2 Materie in Magnetfeldern	242
10.2.1 Dia-, Para- und Ferromagnetismus	242
10.2.2 Die magnetische Suszeptibilität	245
10.2.3 Magnetische Momente in der Quantenmechanik	246
10.2.4 Diamagnetismus	248
10.2.5 Paramagnetische Materialien	249
10.2.6 Grundlagen des Ferromagnetismus	251
10.2.7 Ferromagnetismus in realen Materialien	254
10.3 Anwendungen	256
10.3.1 Hart- und weichmagnetische Materialien	256
10.3.2 Magnetische Datenspeicher	258
10.3.3 Riesenmagnetowiderstand	259
10.4 Schlüsselkonzepte	260
11 Lösungen zu den Übungsaufgaben	263
Literaturverzeichnis	281
Stichwortverzeichnis	285

Überblick über zentrale Begriffe und Phänomene. Nummern von Unterkapiteln verweisen auf die erste Einführung des Begriffs. In Kapiteln, die mit »+« gekennzeichnet sind, ist das jeweilige Konzept von zentraler Bedeutung, in Kapiteln, die mit »o« gekennzeichnet sind, wird der Begriff verwendet, ist aber nicht zentral.

Mechanik/Thermodynamik											
Klassisches Teilchenmodell	1.3.2			0	0		+	+			
Boltzmann-Gesetz		2.2.2					+	+	+		+
Phasenübergänge	0	2.2.3		+					+	+	+
Elektromagnetismus											
Elektrisches Feld	1.3.1			+			+		0	+	+
Magnetfeld	1.3.1										
elektrische Polarisation				3.3.3	+						+
magnetische Polarisation											
Elektromagnetische Welle	1.3.2				+	+	0	0	+		10.2
Interferenz	1.3.2				+	+	0				
Lichtbrechung					4.2.2			0			
Quantenmechanik											
Orbitalmodell				3.3.1	+	+	+	+	+	+	+
Pauli-Prinzip				3.3.2	+	+	+	+	+	+	+
Energieniveaus				3.3	+	+	+	+	+	+	+
Kastenpotential						5.3	+	+	+	+	+
Photonen					4.2.3	+	0	+	+	8.5.1	
spontane Emission										0	+
Spin										0	
Bosonen										0	9.2.2
Fermionen										0	9.2.2
Materialphysik										9.2.2	+
Phasen	1.2.1		+								0
Phasenübergänge		2.2.3		+						+	+
Kristallstruktur		2.2.1			0		+		0	+	0
chemische Bindung	0			3.3.3							
Einfaches Bändermodell					4.3.2	+	+	+	+	0	0
Bandlücke					4.3.2			+	+	0	+
Reziprokes Gitter							6.4	+	+	+	+
Fermikugel							6.4	+	+	+	+
Vollständiges Bändermodell							6.5	+	+	+	+

										18 VIIIA	
										2	4,0025
										He	Helium
										1s ²	
										kfz	0,00018 (g)
										13 IIIA	14 IVA
										15 VA	16 VIA
										17 VIIA	
										5	10,811
										B	Bor
										[He]2s ² 2p ¹	
										tet	2,34
										6	12,011
										C	Kohlenstoff
										[He]2s ² 2p ²	
										dia	2,27
										7	14,007
										N	Stickstoff
										[He]2s ² 2p ³	
										hex	0,0013 (g)
										8	15,999
										O	Sauerstoff
										[He]2s ² 2p ⁴	
										kub	0,0014 (g)
										9	18,998
										F	Fluor
										[He]2s ² 2p ⁵	
										mon	0,0017 (g)
										10	20,180
										Ne	Neon
										[He]2s ² 2p ⁶	
										hex	0,00090 (g)
										13	26,982
										Al	Aluminium
										[Ne]3s ² 3p ¹	
										kfz	2,70
										14	28,086
										Si	Silizium
										[Ne]3s ² 3p ²	
										dia	2,33
										15	30,974
										P	Phosphor
										[Ne]3s ² 3p ³	
										kub	1,82 (weiß)
										16	32,065
										S	Schwefel
										[Ne]3s ² 3p ⁴	
										ort	2,07 (α)
										17	35,453
										Cl	Chlor
										[Ne]3s ² 3p ⁵	
										ort	0,0032 (g)
										18	39,948
										Ar	Argon
										[Ne]3s ² 3p ⁶	
										kfz	0,0018 (g)
										10 VIIIB	11 IB
										12 IIB	
										28	58,693
										Ni	Nickel
										[Ar]3d ⁸ 4s ²	
										kfz	8,91
										29	63,546
										Cu	Kupfer
										[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹	
										kfz	8,96
										30	65,39
										Zn	Zink
										[Ar]3d ¹⁰ 4s ²	
										hex	7,14
										31	69,723
										Ga	Gallium
										[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	
										ort	5,91
										32	72,64
										Ge	Germanium
										[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	
										dia	5,32
										33	74,922
										As	Arsen
										[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	
										rho	5,73
										34	78,96
										Se	Selen
										[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	
										hex	4,81 (grau)
										35	79,904
										Br	Brom
										[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	
										ort	3,10
										36	83,8
										Kr	Krypton
										[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶	
										kfz	0,0037 (g)
										46	106,42
										Pd	Palladium
										[Kr]4d ¹⁰ 5s ⁰	
										kfz	12,02
										47	107,87
										Ag	Silber
										[Kr]4d ¹⁰ 5s ¹	
										kfz	10,49
										48	112,41
										Cd	Cadmium
										[Kr]4d ¹⁰ 5s ²	
										hex	8,65
										49	114,82
										In	Indium
										[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹	
										tet	7,31
										50	118,71
										Sn	Zinn
										[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ²	
										tet	7,37 (weiß)
										51	121,76
										Sb	Antimon
										[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ³	
										rho	6,70
										52	127,6
										Te	Tellur
										[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴	
										hex	6,24
										53	126,9
										I	Jod
										[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵	
										ort	4,93
										54	131,29
										Xe	Xenon
										[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶	
										kfz	0,0059 (g)
										86	222
										Rn	Radon
										[Hg]6p ⁶	
										kfz	0,0097 (g)
										110	281
										Ds	Darmstadtium
										[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ⁰	
										kfz?	34,87
										111	280
										Rg	Roentgenium
										[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ¹	
										kfz?	28,7
										112	285
										Cn	Copernicium
										[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ²	
										?	23,77
										113	284
										Uut	Ununtrium
										[Cn]7p ¹	
										?	167
										114	289
										Fl	Flerovium
										[Cn]7p ²	
										?	147
										115	288
										Uup	Ununpentium
										[Cn]7p ³	
										?	13,57
										116	293
										Lv	Livermorium
										[Cn]7p ⁴	
										?	12,97
										117	292
										Uus	Ununseptium
										[Cn]7p ⁵	
										?	7,27
										118	294
										Uuo	Ununoctium
										[Cn]7p ⁶	
										?	?
										63	151,96
										Eu	Europium
										[Xe]4f ⁷ 5d ⁰ 6s ²	
										kfz	5,24
										64	157,25
										Gd	Gadolinium
										[Xe]4f ⁷ 5d ⁰ 6s ²	
										hex	7,90
										65	158,93
										Tb	Terbium
										[Xe]4f ⁹ 5d ⁰ 6s ²	
										hex	8,23
										66	162,50
										Dy	Dysprosium
										[Xe]4f ¹⁰ 5d ⁰ 6s ²	
										hex	8,55
										67	164,93
										Ho	Holmium
										[Xe]4f ¹¹ 5d ⁰ 6s ²	
										hex	8,80
										68	167,26
										Er	Erbium
										[Xe]4f ¹² 5d ⁰ 6s ²	
										hex	9,07
										69	168,93
										Tm	Thulium
										[Xe]4f ¹³ 5d ⁰ 6s ²	
										hex	9,32
										70	173,04
										Yb	Ytterbium
										[Xe]4f ¹⁴ 5d ⁰ 6s ²	
										kfz	6,90
										71	174,97
										Lu	Lutetium
										[Xe]4f ¹⁴ 5d ⁰ 6s ²	
										hex	9,84
										95	243
										Am	Americium
										[Rn]5f ⁷ 6d ⁰ 7s ²	
										hex	13,69
										96	247
										Cm	Curium
										[Rn]5f ⁸ 6d ⁰ 7s ²	
										hex	13,51
										97	247
										Bk	Berkelium
										[Rn]5f ⁹ 6d ⁰ 7s ²	
										hex	14,78
										98	251
										Cf	Californium
										[Rn]5f ¹⁰ 6d ⁰ 7s ²	
										hex	15,1
										99	252
										Es	Einsteinium
										[Rn]5f ¹¹ 6d ⁰ 7s ²	
										hex	8,84
										100	257
										Fm	Fermium
										[Rn]5f ¹² 6d ⁰ 7s ²	
										?	?
										101	258
										Md	Mendelevium
										[Rn]5f ¹³ 6d ⁰ 7s ²	
										?	?
										102	259
										No	Nobelium
										[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁰ 7s ²	
										?	?
										103	262
										Lr	Lawrencium
										[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁰ 7s ²	
										hex?	?

Funktionswerkstoffe

Physikalische Grundlagen und Prinzipien

Bäker, M.

2014, XV, 299 S. 173 Abb. in Farbe. Mit mehr als 40

Aufg. u. vollst. Lösungen., Softcover

ISBN: 978-3-658-02969-2