

Jens Freudenberger und Martin Heilmaier

Materialkunde der Nichteisenmetalle und -legierungen



**Materialkunde der
Nichteisenmetalle
und -legierungen**

Materialkunde der Nichteisenmetalle und -legierungen

Jens Freudenberger und Martin Heilmaier

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Autoren

Prof. Dr. Jens Freudenberger

IFW Dresden
Helmholtzstr. 20
01069 Dresden
Deutschland

Prof. Dr. Martin Heilmaier

KIT
Engelbert-Arnold-Str. 4
76128 Karlsruhe
Deutschland

Titelbild

Tom Freudenberger, Dresden

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2020 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN 978-3-527-34628-8

ePDF ISBN 978-3-527-82254-6

ePub ISBN 978-3-527-82255-3

Umschlaggestaltung SCHULZ Grafik-Design, Fußgönheim

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zu Materialkunde der Nichteisenmetalle und -legierungen IX

Über die Autoren XI

Einordnung der Metalle 1

Eigenschaftsschaubilder 5

Werkstoffauswahl mithilfe eines Eigenschaftsschaubildes 7

Bezeichnung der Nichteisenmetalle 11

1	Aluminium und Aluminiumlegierungen	15
1.1	Darstellung von Aluminium	19
1.1.1	Das Bayer-Verfahren	19
1.1.2	Das Hall-Héroult-Verfahren	20
1.2	Physikalische Eigenschaften von Aluminium	23
1.3	Legierungssysteme des Aluminiums	26
1.3.1	Klassifikation der Aluminiumlegierungen	26
1.3.2	Das System Aluminium–Kupfer	29
1.3.3	Aushärtung	31
1.4	Aluminiumknetlegierungen	37
1.4.1	Die 2000er-Aluminiumlegierungen	37
1.4.2	Das System Aluminium–Silizium	37
1.4.3	Die 4000er-Aluminiumlegierungen	38
1.4.4	Das System Aluminium–Magnesium	38
1.4.5	Die 5000er-Aluminiumlegierungen	39
1.4.6	Das System Aluminium–Magnesium–Silizium	40
1.4.7	Die 6000er-Aluminiumlegierungen	42
1.4.8	Das System Aluminium–Zink	44
1.4.9	Die 7000er-Aluminiumlegierungen	45
1.4.10	Die 8000er-Aluminiumlegierungen	46
1.4.11	Vergleich der Aluminiumknetlegierungen	47
1.5	Aluminiumgusslegierungen	48
1.5.1	Die 400er-Aluminiumlegierungen	48
1.5.2	Die anderen Aluminiumgusslegierungen	51

- 1.6 Festigkeitseigenschaften von Aluminiumlegierungen bei erhöhter/tiefer Temperatur 52
 - 1.6.1 Hohe Temperatur 52
 - 1.6.2 Tiefe Temperatur 57
- 1.7 Werkstoffverhalten von Aluminiumlegierungen unter wechselnder Beanspruchung 60

- 2 Titan und Titanlegierungen 65**
 - 2.1 Darstellung von Titan 67
 - 2.1.1 Der Kroll-Prozess 68
 - 2.1.2 Das van Arkel-de Boer-Verfahren 70
 - 2.2 Physikalische Eigenschaften von Titan 71
 - 2.2.1 Die Kristallstruktur 71
 - 2.2.2 Löslichkeit von Sauerstoff 72
 - 2.2.3 Reaktionsaktivität von Titan 74
 - 2.2.4 Klassifikation von reinem Titan 75
 - 2.3 Titanlegierungen 76
 - 2.3.1 Klassifikation von Titanlegierungen 76
 - 2.3.2 Einfluss von Legierungselementen 81
 - 2.3.3 Das Gefüge der Titanlegierungen 81
 - 2.3.4 α -Titanlegierungen 86
 - 2.3.5 Nah- α -Titanlegierungen 87
 - 2.3.6 β -Titanlegierungen 89
 - 2.3.7 ($\alpha + \beta$)-Titanlegierungen 94
 - 2.3.8 Überblick über die technisch relevanten Titanlegierungen 97
 - 2.3.9 γ -Titanlegierungen 99
 - 2.3.10 Eigenschaften der Titanlegierungen im Vergleich 101

- 3 Magnesium und Magnesiumlegierungen 109**
 - 3.1 Darstellung von Magnesium 111
 - 3.1.1 Die Schmelzflusselektrolyse von Magnesium 112
 - 3.1.2 Thermische Reduktion 114
 - 3.1.3 Raffination von Magnesium 116
 - 3.2 Physikalische Eigenschaften 117
 - 3.2.1 Die Kristallstruktur von Magnesium 117
 - Mechanische Zwillingsbildung 119
 - 3.2.2 Temperaturabhängigkeit der Dichte 121
 - 3.2.3 Dämpfungsverhalten von Magnesium 123
 - 3.3 Klassifikation von Magnesiumlegierungen 128
 - 3.3.1 Metallurgie der Magnesiumlegierungen 129
 - 3.3.2 Mechanische Eigenschaften von Magnesiumlegierungen 131
 - 3.3.3 Das System Magnesium–Aluminium 133
 - 3.3.4 Magnesium-Dreistoffsysteme 135
 - 3.3.5 Mechanische Eigenschaften der Magnesiumlegierungen 137
 - 3.3.6 Mg–Li-Legierungen 139

4	Nickel und Nickellegierungen	143
4.1	Darstellung von Nickel	145
4.1.1	Flotation des Erzes	146
4.1.2	Rösten des aufkonzentrierten Erzes	146
4.1.3	Gewinnung von Rohnickel	147
4.1.4	Gewinnung von Rein- und Reinstnickel	148
4.2	Physikalische Eigenschaften von Nickel	149
4.2.1	Korrosionsverhalten von Nickel	150
4.3	Nickellegierungen	152
4.3.1	Korrosionsbeständige Nickellegierungen	152
4.3.2	Hochtemperaturbeständige Nickellegierungen	156
4.3.3	Nickelbasissuperlegierungen	161
4.4	Nickel als Basis weichmagnetischer Werkstoffe	179
5	Kupfer und Kupferlegierungen	185
5.1	Darstellung von Kupfer	187
5.2	Einteilung der Kupfersorten	192
5.3	Physikalische Eigenschaften	194
5.4	Mechanische Eigenschaften	200
5.5	Legierungssysteme des Kupfers	202
5.5.1	Messing	206
5.5.2	Bronze	220
5.5.3	Kupfer–Aluminium-Legierungen	229
5.5.4	Kupfer–Nickel-Legierungen	233
5.5.5	Kupfer–Silber-Legierungen	234
5.5.6	Zwillingsbildung zur Festigkeitssteigerung	237
5.5.7	Niedriglegierte Kupferwerkstoffe	238
6	Silber und Silberlegierungen	247
6.1	Darstellung von Silber	249
6.1.1	Silbersorten und ihre Reinheit	250
6.2	Physikalische Eigenschaften von Silber	251
6.3	Mechanische Eigenschaften	253
6.4	Legierungssysteme auf Silberbasis	257
6.4.1	Silber–Nickel-Legierungen	260
6.4.2	Silber–Kupfer-Legierungen	262
6.4.3	Silber–Metalloxid-Verbundwerkstoffe	266
6.4.4	Silber–Quecksilber-Legierungen	270
7	Gold und Goldlegierungen	275
7.1	Darstellung von Gold	277
7.1.1	Goldsorten und ihre Reinheit	280
7.2	Physikalische Eigenschaften von Gold	281
7.3	Mechanische Eigenschaften von Goldlegierungen	289
	Verbinden von Goldbonddrähten	291

7.4	Legierungssysteme des Goldes	292
7.4.1	Gold–Silber-Legierungen	294
7.4.2	Gold–Nickel-Legierungen	295
7.4.3	Gold–Silber–Kupfer-Legierungen	296
7.5	Kontaktwerkstoffe auf Goldbasis	299
8	Platinmetalle und ihre Legierungen	303
8.1	Darstellung der Platinmetalle	307
8.2	Physikalische Eigenschaften der Platinmetalle	308
8.2.1	Wasserstoffatmosphäre	310
8.2.2	Katalytische Eigenschaften	312
8.2.3	Einsatz bei hohen Temperaturen	313
8.3	Mechanische Eigenschaften	314
8.4	Elektrische Eigenschaften	322
8.5	Thermoelektrische Kennwerte	323
	Seebeck- und Peltier-Effekt	324
9	Refraktärmetalle und ihre Legierungen	329
9.1	Darstellung der Refraktärmetalle	334
9.2	Pulvermetallurgie der Refraktärmetalle	337
9.3	Ausgewählte physikalische und chemische Eigenschaften der Refraktärmetalle	338
9.3.1	Die Oxidationsbeständigkeit der Refraktärmetalle	338
9.3.2	Mechanische Eigenschaften	339
9.3.3	Legierungsentfestigung	345
9.3.4	Die thermische Ausdehnung	347
9.4	Molybdän und Molybdänlegierungen	348
9.5	Oxidationsbeständige Molybdänlegierungen	353
9.5.1	Das Legierungssystem Mo–Si–B	354
9.6	Wolfram und Wolframlegierungen	360
9.7	Tantal und Tantallegierungen	366
	Stichwortverzeichnis	369

Vorwort zu Materialkunde der Nichteisenmetalle und -legierungen

Dieses Buch richtet sich an alle Studentinnen, Studenten und Lehrkräfte, die sich in ihren Studiengängen mit der Materialkunde von Werkstoffen befassen. Folglich wird inhaltlich ein weiter Bogen von den Naturwissenschaften über die Materialwissenschaft und Werkstofftechnik bis hin zu den Ingenieurwissenschaften gespannt. Als wir an den bisher von uns mit Lehre bedachten universitären Standorten Darmstadt, Dresden, Freiberg, Karlsruhe und Magdeburg mit der Frage konfrontiert waren, eine Vorlesung über *Metallische Werkstoffe* abzuhalten, mussten wir sehr schnell realisieren, dass es über die hier im Fokus stehenden Nichteisenmetalle kein geeignetes Lehrbuch gab und wir uns daher die Informationen mühsam pro Werkstoffgruppe zusammensuchen mussten.

Weil aber Lehre – sowohl was den Inhalt als auch die Art und Weise der Präsentation betrifft – immer stark von der jeweiligen Lehrkraft abhängig ist, so erhebt auch dieses Buch keineswegs den Anspruch auf Vollständigkeit; im Gegenteil werden die Leserinnen und Leser an der einen oder anderen Stelle bemerken, welche Themen offensichtliche „Lieblinge“ der Verfasser sind. Demzufolge haben wir auch nicht die gesamte Palette der Nichteisenmetalle in dieses Buch aufgenommen, sondern eine für uns relevante subjektive Auswahl getroffen.

Wir wünschen viel Spaß beim Lesen und Arbeiten mit diesem Buch und freuen uns sehr auf Lob, Anregungen und Kritik.

Dresden und Karlsruhe, April 2020

Jens Freudenberger und Martin Heilmaier

Über die Autoren



Jens Freudenberger leitet die Abteilung Metallphysik am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden, und er ist Honorarprofessor für Physikalische Metallkunde der Nichteisenmetalle am Institut für Werkstoffwissenschaft der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Jens Freudenberger hat an der Johann Wolfgang Goethe Universität in Frankfurt am Main Physik studiert und wurde ebenfalls in Physik an der Technischen Universität Dresden promoviert. Ebendort habilitierte er sich in der Werkstoffwissenschaft. Die Forschungsschwerpunkte von Jens Freudenberger liegen in den Bereichen der Plastizität sowie der Ver- und Umformmechanismen metallischer Werkstoffe. Jens Freudenberger ist verheiratet und hat zwei Kinder, die jedoch selten auf die Namen Tom und Anne reagieren. Immerhin hört seine Hündin Kira auf ihn.



Martin Heilmaier, Lichtgestalt der deutschen Werkstoffwissenschaft, ist Professor für Werkstoffkunde am Institut für Angewandte Materialien des Karlsruher Instituts für Technologie. Martin Heilmaier hat Werkstoffwissenschaften an der Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg studiert, wo er auch zum Dr.-Ing. promoviert wurde. Er arbeitete in leitender Funktion unter anderem als Mentor von Jens Freudenberger am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden, bevor er als Hochschullehrer an die Universität Magdeburg und später an die Technische Universität Darmstadt und wiederum noch später an das Karlsruher Institut für Technologie berufen wurde. Die Forschungsschwerpunkte von Martin Heilmaier liegen im Bereich der physikalischen Metallkunde, insbesondere interessiert er sich für Hochtemperaturwerkstoffe. Martin Heilmaier ist verheiratet und hat vier Kinder von zwei Frauen.

Einordnung der Metalle

Ohne neue Werkstoffe sind Innovationen in Industrie und für die Gesellschaft kaum noch zu erreichen. Damit kommt der Forschung nach neuen Materialien eine Schlüsselstellung bezüglich der Gestaltung der Zukunft zu.¹ Eine der wichtigsten Werkstofffamilien ist die der Metalle. Diese werden grundlegend anhand der metallischen Bindung, die zwischen den Atomen besteht, klassifiziert. In der geschichtlichen Entwicklung der Menschheit nahm die Bedeutung der Metalle bis etwa 1960 stetig zu. Abbildung 1 stellt die Bedeutung der vier wesentlichen Werkstofffamilien zu den jeweiligen Epochen einander gegenüber.

¹ In der Geschichte waren die erfolgreichsten Gesellschaften immer diejenigen, die im Besitz der modernsten Technologien waren.

Insbesondere die Verfügbarkeit von Eisen und Stahl hat zum deutlichen Zuwachs der „relativen Wichtigkeit von Metallen“ geführt. Dies liegt nicht zuletzt an den sehr vielseitig

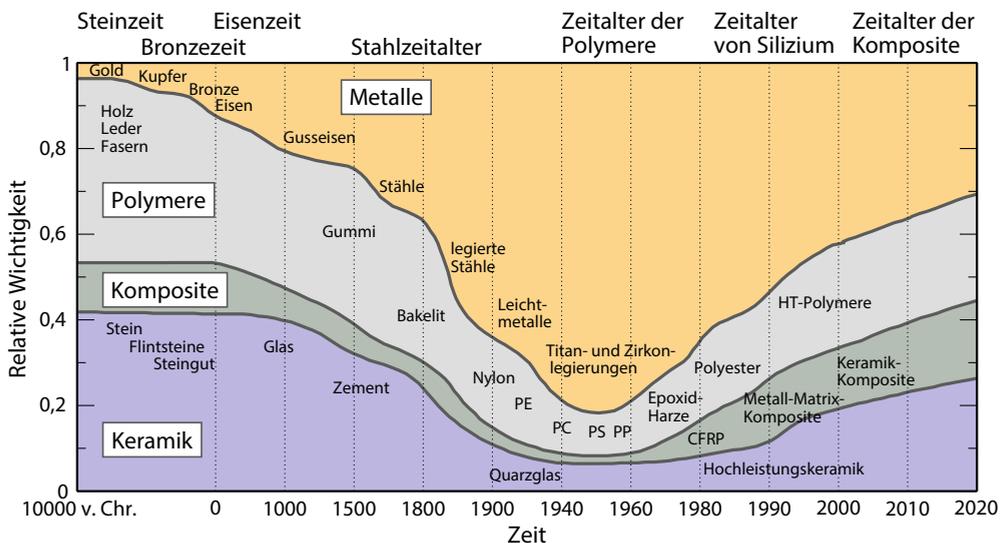


Abb. 1 Relative Wichtigkeit der Werkstoffe im Verlauf der Menschheitsgeschichte. Nach: M. Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, 2005.

einsetzbaren sowie leicht und kostengünstig herstellbaren Werkstoffen auf der Basis von Eisen.

Aus diesem Grund erfolgt in der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik die Einteilung der Metalle grob in Eisen- und Nichteisenmetalle. Heute stehen die Nichteisenmetalle den eisenbasierten Werkstoffen im Hinblick auf ihre technische und wirtschaftliche Bedeutung nicht nach. Wegen ihrer Vielfalt erfolgt für die Nichteisenmetalle eine weitere Einteilung in Leichtmetalle (Metalle und ihre Legierungen mit einer Dichte kleiner als $4,5 \text{ g/cm}^3$), Buntmetalle,² Alkali- und Erdalkalimetalle, seltene Metalle, hochschmelzende Metalle (Metalle mit einer Schmelztemperatur oberhalb von der des Platins), Refraktärmetalle (Elemente der fünften und sechsten Gruppe im Periodensystem der Elemente mit einer Schmelztemperatur oberhalb von $2000 \text{ }^\circ\text{C}$), die Metalle der Platingruppe (Elemente der Gruppen 8–10 der fünften und sechsten Gruppe im Periodensystem der Elemente) und Edelmetalle. Diese Gruppierungen überlappen sich teilweise und werden auch im Sprachgebrauch unterschiedlich definiert. So sind z. B. die Metalle der Platingruppe ein Teil der Edelmetalle.

² Für die Buntmetalle gibt es keine einheitliche Festlegung, häufig sind dies die Metalle, deren Erze eine besonders bunte Farbenpracht zeigen.

Abbildung 2 zeigt die Metalle im Periodensystem der Elemente (die Farbtiefe entspricht der Einteilung in Leicht- und Schwermetalle anhand ihrer Dichte) sowie die weitere Unterteilung in hochschmelzende Metalle, Refraktärmetalle

IA																	VIIIA																												
1 H																	2 He																												
IIA												III A	IV A	V A	VIA	VII A	VIIIA																												
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																												
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																												
		IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B				IB	IIB																																	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																												
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																												
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																												
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og																												
		<table border="1"> <tr> <td>58 Ce</td><td>59 Pr</td><td>60 Nd</td><td>61 Pm</td><td>62 Sm</td><td>63 Eu</td><td>64 Gd</td><td>65 Tb</td><td>66 Dy</td><td>67 Ho</td><td>68 Er</td><td>69 Tm</td><td>70 Yb</td><td>71 Lu</td> </tr> <tr> <td>90 Th</td><td>91 Pa</td><td>92 U</td><td>93 Np</td><td>94 Pu</td><td>95 Am</td><td>96 Cm</td><td>97 Bk</td><td>98 Cf</td><td>99 Es</td><td>100 Fm</td><td>101 Md</td><td>102 No</td><td>103 Lr</td> </tr> </table>																58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																																
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																																

Abb. 2 Periodensystem der Elemente: □ Nichtmetalle, □ Metalloide, □ Leichtmetalle mit $\rho \leq 4,5 \text{ g/cm}^3$, □ Metalle mit $4,5 < \rho \leq 10 \text{ g/cm}^3$, □ Metalle mit $10 < \rho \leq 15 \text{ g/cm}^3$, □ Metalle mit $\rho > 15 \text{ g/cm}^3$, □ hochschmelzende Metalle, □ Refraktärmetalle und □ Metalle der Platingruppe.

und Metalle der Platingruppe, wie sie in diesem Buch verwendet wird.

Der Verbrauch der Nichteisenmetalle wie Kupfer, Aluminium, Blei, Zink, Zinn und Nickel betrug 2010 in Deutschland etwa 3 Mt, im Vergleich zu etwa 40 Mt Stahl. Dabei übersteigt der Metallwert pro Kilogramm jedes dieser Metalle den des Eisens, wie aus Abb. 3 ersichtlich ist.

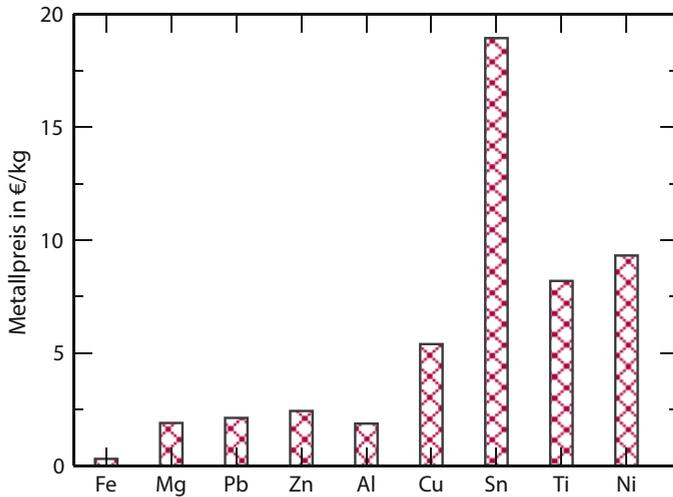


Abb. 3 Preise der wichtigsten Nichteisenmetalle und von Roheisen (Stand April 2017). Edelmetalle wie Silber (561 €/kg) Gold (38 942 €/kg) würden diese Darstellung sprengen und sind daher gar nicht erst angeführt.

Anhand des Metallwertes von 0,3 €/kg für Eisen bis zu knapp 20 €/kg für Zinn ist leicht ersichtlich, warum die Eisenwerkstoffe eine so große technische Bedeutung erlangen konnten. Hinzu kommen die gute Verarbeitbarkeit von Eisen und seinen Legierungen und die hohe Verfügbarkeit von Eisenerz bzw. Stahlschrott. Bezogen auf die Metalle ist Eisen in der Erdkruste das dritthäufigste Element. Häufiger sind nur Aluminium, welches schwerer als Element darstellbar ist,³ und Kalzium, welches als Basismetall keine technologische Bedeutung hat.

Die Tab. 1 listet den Gehalt der Metalle in der Erdkruste auf und gibt gleichzeitig die wichtigsten Erze und den Metallgehalt in den Erzen an.

Erst wenn Stahl und andere Werkstoffe auf Eisenbasis an ihre spezifischen Grenzen stoßen, dann wird nach einem alternativen Werkstoff gesucht. Damit beruht die Verwendung von Eisenbasiswerkstoffen auf der Bequemlichkeit der Bauteilhersteller, da diese einen Werkstoff bevorzugen, den sie im

³ Vor Entdeckung des Hall-Herault-Prozesses im Jahr 1886 hatte Aluminium keine Bedeutung.

Tab. 1 Gehalte der Metalle in der Erdkruste sowie die wichtigsten Mineralien, die zur Darstellung der Metalle gewonnen werden. Metalle mit einem Gehalt von mehr als 1 m.% sind vollständig angegeben. Für weniger häufige Metalle erfolgte eine Auswahl.

Element	Gehalt in der Erdkruste in m.%	Mineral		Metallgehalt im Erz in m.%
		Name	Formel	
Aluminium	8,19	Böhmit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	45
Kalzium	4,1	Kalzit	$\text{Ca}[\text{CO}_3]$	40
		Gips	$\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	23
Eisen	4,1	Magnetit	Fe_2O_4	72
		Hämatit	Fe_2O_3	67
Natrium	2,3	Halit	NaCl	39
Magnesium	2,3	Magnesit	MgCO_3	28,8
		Dolomit	$(\text{Mg,Ca})\text{CO}_3$	13,1
Kalium	2,1	Carnallit	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	0,6
Titan	0,56	Rutil	TiO_2	60
		Ilmenit	FeTiO_3	31
Mangan	0,095	Pyrolusit	MnO_2	63
Zirkonium	0,019	Zirkon	ZrSiO_4	49
Vanadium	0,016	Patronit	V_2S_3	33
Chrom	0,01	Chromeisenstein	$\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$	46
Nickel	0,008	Garnierit	$(\text{Mg,Ni})_3 \cdot \text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	25
		Pentlandit	$(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$	33
Zink	0,0075	Zinkblende	ZnS	67
Kupfer	0,005	Kupferkies	CuFeS_2	34
		Kupferglanz	Cu_2S	80
Lithium	0,002	Amblygonit	$\text{LiAl}(\text{F,OH}/\text{PO}_4)$	4,7
Kobalt	0,002	Kobaltkies	$\text{CoS}, \text{Co}_2\text{S}_3$	38
Niob	0,002	Niobit	$(\text{Fe,Mn}),(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6$	54
Blei	0,0014	Bleiglanz	PbS	87
Beryllium	0,000 26	Beryll	$3 \text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	5
Uran	0,000 24	Pechblende	$\text{UO}_3 \cdot \text{UO}_2$	85
Zinn	0,000 22	Zinnstein	SnO_2	78
Tantal	0,0002	Tantalit	$(\text{Fe,Mn}),(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_6$	69
Molybdän	0,000 15	Molybdänit	MoS_2	60
Wolfram	0,0001	Scheelit	CaWO_4	64
Silber	$7 \cdot 10^{-06}$	Argentit	Ag_2S	87
Gold	$1,1 \cdot 10^{-07}$	Gold	Au	100
Platin	$1 \cdot 10^{-07}$	Platin	Pt	100
Palladium	$6 \cdot 10^{-08}$	Palladium	Pd	100
Rhodium	$2 \cdot 10^{-08}$	Rhodium	Rh	100
Iridium	$3 \cdot 10^{-10}$	Iridium	Ir	100

Detail kennen. Anders herum ist der Einsatz von Nichteisenmetallen an die Unzulänglichkeiten von Stahl bzw. eisenbasierten Werkstoffen geknüpft.⁴

Eigenschaftsschaubilder

Das Anforderungsprofil an Werkstoffe ist in der Regel sehr komplex. Dennoch sind es in vielen Fällen nur eine oder zwei herausragende Eigenschaften eines Werkstoffs, die für seine Anwendung entscheidend sind. Insbesondere die Kombination mehrerer Eigenschaften stellt den Anwender vor die Aufgabe, diese Profile gegeneinander abzuwägen. So sind z. B. für die Auslegung im strukturellen Leichtbau das Festigkeit-zu-Dichte-Verhältnis R_f/ρ bzw. das Steifigkeit-zu-Dichte-Verhältnis E/ρ entscheidend. Es ist naheliegend, diese beiden Eigenschaften für eine Vielzahl von Werkstoffen gegeneinander aufzutragen, um die für den Anwendungsfall relevanten Werkstoffe zu isolieren. Die Tab. 2 gibt einen groben Überblick, welche Eigenschaften für eine Werkstoffauswahl relevant sein können, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

Diese Eigenschaften können nun nahezu beliebig einander gegenübergestellt werden. Die so entstehenden Eigenschaftsschaubilder werden auch Ashby-Diagramme⁵ genannt. Das

⁴ Würde man z. B. einen guten Leiterwerkstoff benötigen, käme Stahl nicht mehr infrage, wohl aber Kupfer als Basismetall. Ein leichter und biokompatibler, aber dennoch fester Werkstoff wäre hingegen Titan.

⁵ Frei nach ihrem Erfinder Michael Farries Ashby.

Tab. 2 Grundlegende Werkstoffeigenschaften, die die Werkstoffauswahl bestimmen können.

Klasse	Eigenschaft	Symbol und Einheiten
allgemein	Dichte	ρ kg/m ³
mechanisch	Elastizitätsmodul	E GPa
	Streckgrenze	$R_{p0,2}$ MPa
	Zugfestigkeit	R_m MPa
	Bruchfestigkeit	R_f MPa
	Härte	H —
	Dehnung	ε —
	Dauerschwingfestigkeit	R_d MPa
thermisch	Bruchzähigkeit	K_{Ic} MPa \sqrt{m}
	Schmelztemperatur	T_S K
	thermische Leitfähigkeit	λ W/m K
	therm. Ausdehnungskoeffizient	α 1/K
	spezifische Wärme	C_p J/kg K
elektrisch	spezifischer Widerstand	ρ Ω m
	elektrische Leitfähigkeit	σ S

Ziel der Werkstoffauswahl besteht nun darin, ein Produkt zu schaffen, das seine Funktion effektiv, sicher und kosteneffizient erfüllt. Hierfür sind zunächst die Basiseigenschaften zu analysieren. Um den richtigen Werkstoff auswählen zu können, benötigt man eine Reihe von Informationen, die neben den eigentlichen Prüfdaten auch deren statistische Auswertung umfasst, um das Bauteil für die vorgesehene Betriebszeit sicher auslegen zu können. Hieran schließt sich eventuell eine Wirtschaftlichkeitsanalyse an. In der Regel kann man auf Handbücher, Werkstoffdatenblätter oder Werkstoffdatenbanken zurückgreifen, um diese Informationen zu erhalten. Diese sind hierarchisch organisiert, wie aus Tab. 3 ersichtlich ist.

Tab. 3 Zur hierarchischen Organisation von Werkstoffdaten.

Werkstofffamilie	z. B. Metalle
Werkstoffklasse	z. B. Aluminiumlegierungen
Werkstoffgruppe	z. B. 6xxx-Legierung
Werkstoff	z. B. EN AW 6061 Al Mg1 Si Cu

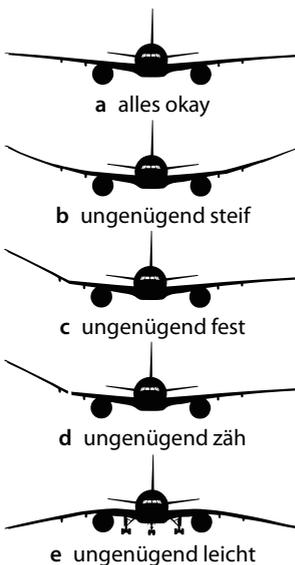


Abb. 4 Was so alles schief gehen kann, wenn der Werkstoff ungeeignet ist...

Der Werkstoff, aus dem der Rahmen eines Flugzeugs gebaut wird, sollte leicht, steif, fest und zäh sein. Erfüllt ein Werkstoff nicht alle diese Kriterien gleichzeitig, können die strukturelle Integrität des Flugzeugs und damit seine Funktion beeinträchtigt sein (s. Abb. 4). Die Ashby-Diagramme helfen auch hier bei der Werkstoffauswahl. Man geht iterativ vor und sucht zunächst einen leichten Werkstoff, der hinreichend steif ist, also einen hohen Elastizitätsmodul besitzt – mit anderen Worten: diejenigen Werkstoffe, die sich möglichst weit in der linken oberen Ecke des entsprechenden Eigenschaftsschaubildes, Abb. 5, befinden.

Die Dichte ρ hängt ab von der atomaren Masse und der Struktur, in der die Atome angeordnet sind. Die Radien der Atome variieren nicht wesentlich (maximal etwa um einen Faktor 2), Gleiches gilt für die Packungsdichte (hexagonal dicht gepackt und kubisch flächenzentriert: 0,74; Diamantgitter: 0,34). Damit ist die Masse relevant (Atomgewicht von 1 (Wasserstoff) bis 238 (Uran)). Metalle sind also schwer und dicht gepackt, während Polymere leicht sind, da sie weitgehend aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Die leichtesten Elemente in der am wenigsten dichten Packung ergeben immer noch $\rho \approx 1 \text{ g/cm}^3$; darunter findet man Schäume.

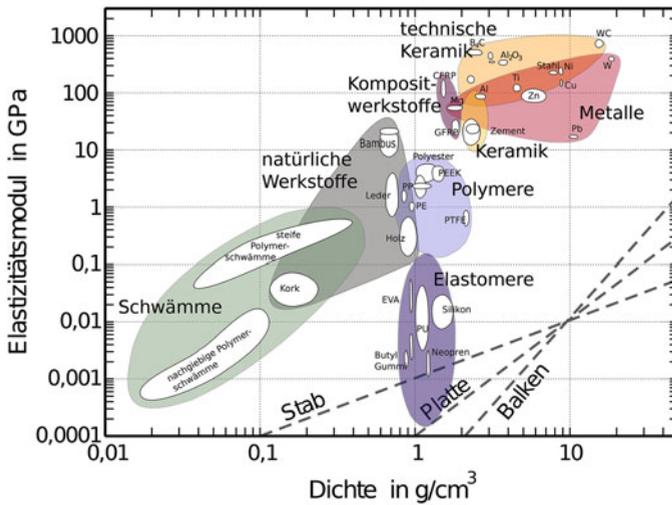


Abb. 5 Gegenüberstellung von Elastizitätsmodul und Dichte in einem Eigenschaftsschaubild. Die Blasen gruppieren Werkstofffamilien, die diagonalen Konturlinien helfen bei der Auswahl in Bezug auf die Lastverhältnisse. Nach: M. Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, 2005.

Werkstoffauswahl mithilfe eines Eigenschaftsschaubildes und den dazu gehörenden Leistungsindices

Nachfolgend sind drei Rechenbeispiele gegeben, in denen jeweils das Gewicht des Bauteils durch Werkstoffauswahl minimiert werden soll.

Fester, leichter Spannstab

Die Masse eines Rundstabes ergibt sich wie folgt:

$$m = Al\rho \quad (1)$$

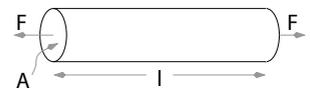
Hierin sind m die Masse, A die Querschnittsfläche, l die Länge des Stabes und ρ die Dichte des Werkstoffs. Randbedingungen: l ist vorgegeben und der Stab darf unter der anliegenden Kraft F nicht versagen.

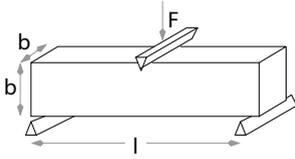
$$\frac{F}{A} < R_{p0,2} \quad (2)$$

Die freien Variablen sind der Werkstoff und die Querschnittsfläche. Kombiniert man die Gl. 1 und 2, so bekommt man:

$$m \geq \frac{F}{R_{p0,2}} l\rho \quad (3)$$

Die Aufgabe besteht nun darin, einen Werkstoff auszuwählen, der den günstigsten $\rho/R_{p0,2}$ -Wert besitzt.





Leichter Balken mit hoher Steifigkeit

Die Masse eines quadratischen Balkens berechnet sich gemäß:

$$m = Al\rho = b^2 l\rho \quad (4)$$

Hierin ist b die Breite und Höhe des Biegebalkens. Auch hier gilt wieder eine Randbedingung derart, dass die Steifigkeit S vorgegeben ist:

$$S = C \frac{E\Theta}{l^3} \quad (5)$$

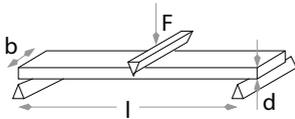
Hierin sind E der Elastizitätsmodul, $\Theta = b^4/12$ das Flächenträgheitsmoment und C eine Konstante. Als freie Variablen gelten abermals der Werkstoff und in diesem Fall noch die Kantenlänge b .

Dann gilt:

$$S = \frac{CEb^4}{12l^2} \quad \text{und damit:} \quad b^2 = \sqrt{\frac{12Sl^2}{CE}} \quad (6)$$

$$m = \sqrt{\frac{12l^2 S}{C}} \frac{\rho}{\sqrt{E}} \quad (7)$$

Die Aufgabe besteht nun darin, einen Werkstoff auszuwählen, der den günstigsten ρ/\sqrt{E} -Wert besitzt.



Leichte Platte mit hoher Steifigkeit

Analog wie zuvor ergibt sich die Masse einer Platte zu:

$$m = Al\rho = bdl\rho \quad (8)$$

Mit

$$\Theta = \frac{bd^3}{12} \quad (9)$$

gilt:

$$S = \frac{CEbd^3}{12l^2} \quad \text{und damit:} \quad t = l^2 \sqrt[3]{\frac{12S}{CEm}} \quad (10)$$

$$m = l^2 \sqrt[3]{\frac{12Sb^2}{C}} \frac{\rho}{\sqrt[3]{E}} \quad (11)$$

Die Aufgabe besteht nun darin, einen Werkstoff auszuwählen, der den günstigsten $\rho/\sqrt[3]{E}$ -Wert besitzt.

Ashby hat einen Leistungsindex festgelegt, der sich aus den zuvor ermittelten Verhältnissen ergibt. Allerdings invertiert man die Verhältnisse um möglichst große Zahlenwerte als Optimum zu erhalten. So gilt für die feste leichte Spannstange:

Maximiere den Leistungsindex M , der sich wie folgt berechnet:

$$M = \frac{R_{p0,2}}{\rho} \quad (12)$$

Entsprechend gilt für Werkstoffe, die auf eine hohe Steifigkeit optimiert werden, Folgendes:

$$M = \frac{E}{\rho} \quad \text{Stange bzw. Stab unter Zugbeanspruchung}$$

$$M = \frac{\sqrt{E}}{\rho} \quad \text{Balken unter Biegebeanspruchung}$$

$$M = \frac{\sqrt[3]{E}}{\rho} \quad \text{Blech unter Biegebeanspruchung}$$

Diese Leistungsindizes sind als gestrichelte Auslegungslinien in den Eigenschaftsschaubildern mit angegeben (siehe Abb. 5, Seite 7 bzw. Abb. 6 als Detailausschnitt rechts). Stünde anstelle der Steifigkeit die Festigkeit im Fokus der Werkstoffauswahl, dann wäre in den zuvor genannten Leistungsindizes der Elastizitätsmodul E durch die Streckgrenze $R_{p0,2}$ zu ersetzen.

Jede Kombination von Funktion, Zielsetzung, Randbedingungen und freier Variable hat einen charakteristischen Leistungsindex, der dem Ingenieur hilft eine Werkstoffauswahl zu treffen. Die physikalische Metallkunde hingegen betrachtet die Werkstoffeigenschaften isoliert voneinander, um das Verhalten der Werkstoffe zu verstehen. So wird in Anlehnung zu den vorherigen Beispielen der Elastizitätsmodul im Wesentlichen auf die Bindung und den Atomradius r_0 zurückgeführt.

$$E = \frac{S}{r_0} \quad (13)$$

Die hierin enthaltene Federkonstante S der Bindungen ist in Tab. 4 für die vorherrschenden Bindungstypen angegeben.

Tab. 4 Stärke der Bindungen.

Bindungsart	Federkonstante S
kovalent	20 bis 200 N/m
metallisch	10 bis 50 N/m
ionisch	15 bis 100 N/m
van der Waals	0,5 bis 2 N/m

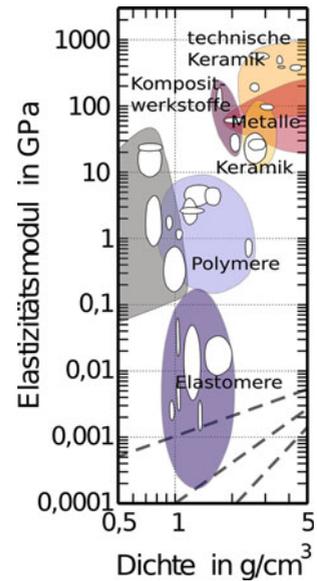


Abb. 6 Ausschnitt aus Abb. 5, das vollständige Diagramm befindet sich auf Seite 7. Nach: M. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, 2005.

Die größten Atome mit den schwächsten Bindungen bilden Festkörper mit einem E-Modul von etwa 1 GPa. Geringere E-Module werden für Schäume und Elastomere beobachtet.

Wie schon in den Beispielen angedeutet spielt bei der Werkstoffauswahl für den strukturellen Leichtbau neben der Steifigkeit auch die Festigkeit von Werkstoffen eine wichtige Rolle. Die vielen Werkstofffamilien reagieren unterschiedlich auf mechanische Beanspruchung. Folglich stehen unterschiedliche Kenngrößen im Fokus, wenn die Werkstoffe innerhalb ihrer Familien verglichen werden sollen. Für Metalle ist in der Regel die Streckgrenze, selten die Zugfestigkeit, die zentrale Vergleichsgröße. Bei Keramiken bezieht man sich auf deren Druckfestigkeit und für Kompositwerkstoffe wird in der Regel die Bruch- oder Zerreißfestigkeit angegeben. Dennoch gelingt es in einem Eigenschaftsschaubild die Festigkeiten der Werkstofffamilien einander gegenüberzustellen, wie aus Abb. 7 ersichtlich ist.

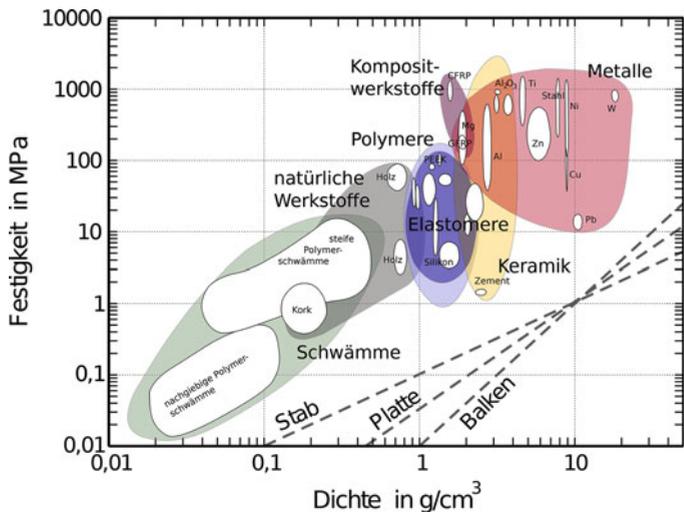


Abb. 7 Gegenüberstellung von Festigkeit (Streckgrenze bei Metallen und Polymeren, Druckfestigkeit bei Keramiken, Zugfestigkeit bei Kompositwerkstoffen und Reißfestigkeit bei nachgiebigen Polymeren) und Dichte in einem Eigenschaftsschaubild. Die Blasen gruppieren Werkstofffamilien, die diagonalen Konturlinien helfen bei der Auswahl in Bezug auf die Lastverhältnisse. Nach: M. Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, 2005.

Die Möglichkeiten, verschiedene Eigenschaften der Werkstoffe einander gegenüber zu stellen, sind beliebig vielfältig. Daher sei an dieser Stelle auf das Buch von M. Ashby verwiesen⁶, in dem von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht wird. In diesen Eigenschaftsschaubildern gibt es Bereiche, die leer

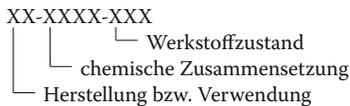
⁶ M. Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, 2005.

bleiben. Dies hat in der Regel fundamentale Gründe, bzw. die entsprechenden Werkstoffe sind noch nicht entdeckt.

Bezeichnung der Nichteisenmetalle

Die Normung der Nichteisenmetalle bestimmt die metallischen Werkstoffe nach Art, Eigenschaften und Benennung sowie ihre Prüfverfahren in Bezug auf die mechanischen oder chemischen Kennwerte. Die Normung unterteilt die Metalle als Rohstoff, Gussmetall und Reckmetall.

Kurzzeichen ermöglichen eine Klassifizierung der Werkstoffe, die auch die Legierungszusammensetzung grob abbildet. Diese Kurzzeichen sind wie folgt gegliedert:



Für Herstellung und Verwendung stehen dabei:

- G = Guss (allgemein)
- GD = Druckguss
- GK = Kokillenguss
- GZ = Schleuderguss
- V = Vor- und Verschnittlegierungen
- GL = Gleitlagerwerkstoffe
- S = Schweißzusatzstoff, (Weich-)Lot

Die chemische Zusammensetzung wird für unlegierte Metalle anhand der Reinheit angegeben, die Begleitelemente werden nicht genannt, z. B. Pb99,99. Hierbei handelt es sich um Feinblei mit einem Gehalt von mindestens 99,99 at.%.^{7,8,9} Legierungen werden durch die aufeinander folgenden chemischen Symbole gekennzeichnet, teilweise mit Angabe der jeweiligen Gehalte der Legierungselemente, z. B. CuCr1 kennzeichnet eine CuCr-Legierung mit einem Cr-Gehalt von 1%. Gehalte von unter 1% werden in der Regel nicht angegeben, z. B. steht AlMg3Si für eine Aluminiumlegierung mit einem Magnesiumgehalt von 3 m.% und einem nicht näher spezifizierten, jedoch signifikanten Zusatz von Silizium. Im Grunde genommen verkommt die Angabe der Zusammensetzung damit zu einer Angabe von Art und (ungefährer) Menge des Hauptlegierungselements. Oft sind diese Informationen aber ausreichend. S-Sn70Pb30 kennzeichnet Zinn-Blei-Lote, GL-Sn80 kennzeichnet Lagermetalle mit einem Zinngehalt von

⁷ Die Reinheit wird auch als 4N (mit N = Neuner) bezeichnet. Entsprechend würde man 99,997 at.% mit 4N7 kennzeichnen.

⁸ Für einige Metalle wird eine spezielle Basis für die Reinheit verwendet. So bezieht sich die Reinheit, die für Seltenerdmetalle angegeben wird, in der Regel nur auf Verunreinigungen durch andere Seltenerdmetalle.

⁹ Im weiteren Verlauf dieses Buches werden die folgenden prozentualen Angaben verwendet: at.% = Atomprozent, m.% = Masseprozent, Vol.% = Volumenprozent. Sofern nichts explizit angegeben wird, ist immer „m.%“ gemeint.

¹⁰ In diesem Fall: Sn: 80 %;
Cu: 5 bis 7 %; Sb: 11 bis 13 %;
Pb: 1 bis 3 %.

80 %. Aus den dazugehörigen Normen kann man noch die weiteren Legierungsbestandteile entnehmen.¹⁰

Der Werkstoffzustand kennzeichnet in dieser Bezeichnung eine besondere Eigenschaft, die den Werkstoff im Wesentlichen charakterisiert. Dies kann der Behandlungszustand sein, aber auch spezifische Werkstoffeigenschaften, wie die Festigkeit – z. B. kennzeichnet MgAl6Zn-F27 eine Magnesiumlegierung mit einem Aluminiumgehalt von 6 m.% und einem Zinkzusatz, die eine Festigkeit von wenigstens 270 N/mm² aufweist.

Für einige Nichteisenmetalle existiert eine abweichende EN-Norm. Diese ist unübersichtlich und gilt spezifisch für die jeweiligen Werkstoffklassen. So gilt beispielsweise für Kupfer hinsichtlich der Gießverfahren:

GS = Sandguss
GM = Kokillenguss
GP = Druckguss

Für den Zustand gilt (jeweils gefolgt von einer dreistelligen Zahl):

R = minimale Zugfestigkeit
H = minimale Härte
G = minimale Korngröße

¹¹ Zum Beispiel EN-AC-
AlSi7MgK-T6.

Für Aluminiumlegierungen gilt folgende Kennzeichnung:¹¹

EN = europäische Norm
A = Aluminium
W = Knetlegierungen (engl. *wrought alloys*)
C = Gusslegierungen (engl. *cast alloys*)

Das Gießverfahren kann ebenfalls genannt werden (ist aber nicht die Regel):

S = Sandguss
K = Kokillenguss
D = Druckguss

Für den Zustand, der entsprechend der in Tab. 5 angegebenen Nomenklatur ergänzt wird, kann ergänzt werden:

F = im bearbeiteten Zustand
O = im weichgeglühten Zustand
W = im lösungsbehandelten Zustand
H = im kaltverformten Zustand (s. Tab. 5)
T = im ausgehärteten Zustand (s. Tab. 5)

Tab. 5 Zustandsbezeichnungen von Aluminiumlegierungen im kaltverformten oder ausgehärteten Zustand.

H1x	nur kaltverformt (das <i>x</i> bezieht sich auf den Grad der Kaltverformung und der Verfestigung)
H12	kaltverformt mit 1/4 der Festigkeit von H18
H14	kaltverformt mit 1/2 der Festigkeit von H18
H16	kaltverformt mit 3/4 der Festigkeit von H18
H18	kaltverformt mit einer Querschnittsreduktion von 75 %
H19	kaltverformt mit einer Festigkeit um etwa 14 MPa höher als die von H18
H2x	kaltverformt und teilweise gegläht
H3x	kaltverformt und bei niedriger Temperatur stabilisiert (hierbei soll das Aushärten der Legierung verhindert werden)
T1	von der Herstellungstemperatur abgekühlt und natürlich gealtert
T2	von der Herstellungstemperatur abgekühlt, kaltverformt und natürlich gealtert
T3	lösungsgeglüht, kaltverformt und natürlich gealtert
T4	lösungsgeglüht und natürlich gealtert
T5	von der Herstellungstemperatur abgekühlt und künstlich gealtert
T6	lösungsgeglüht und künstlich gealtert
T7	lösungsgeglüht und durch Überalterung stabilisiert
T8	lösungsbehandelt, kaltverformt und künstlich gealtert
T9	lösungsgeglüht, künstlich gealtert und kaltverformt
T10	von der Herstellungstemperatur abgekühlt, kaltverformt und künstlich gealtert

1

Aluminium und Aluminiumlegierungen

Aluminium ist ein silbrig-weißes Leichtmetall. Mit einem Gehalt von circa 8,2 % ist es das in der Erdkruste am häufigsten vorkommende metallische Element. Allerdings kommt Aluminium aufgrund seines unedlen Charakters in der Natur nicht gediegen, sondern ausschließlich in gebundener Form vor. Die Herstellung von metallischem Aluminium ist daher sehr aufwändig. Hinzu kommt, dass die Gewinnung von Aluminium in einem großtechnischen Maßstab an die Verfügbarkeit von elektrischer Energie geknüpft ist. Die wirtschaftliche Verarbeitung des Aluminiums geschah deshalb erst ab dem Ende des 19. Jahrhunderts, als elektrische Energie in ausreichender Menge zur Verfügung stand und der sogenannte Hall-Héroult-Prozess zur elektrolytischen Reduktion von Al_2O_3 zu flüssigem Metall bereitstand. Zuvor war Aluminium ein Symbol von Macht und Reichtum.^{1,2} Heute sind die Anwendungsmöglichkeiten vielfältig und reichen von Getränkedosen, Haushaltsgegenständen bis hin zu Fahrzeugkomponenten und Anlagen für die chemische Industrie. Der Großteil der Aluminiumlegierungen wird im Verkehrssektor verarbeitet, s. Abb. 1.1.

Die Tab. 1.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften von Aluminium und ordnet die Kennwerte in

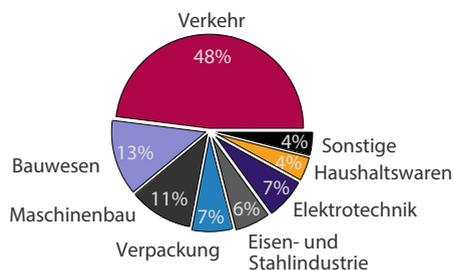


Abb. 1.1 Hauptanwendungsgebiete des Aluminiums für das Jahr 2015 in Deutschland. Nach: Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., 2017. URL: www.aluinfo.de/absatzmaerkte.html (letzter Zugriff: 12/2018).

¹ Napoleon III. folgte den Trends seiner Zeit, die als Zeitalter des Fortschritts gilt. Mitte des 19. Jahrhunderts war Aluminium ein seltenes und unglaublich teures Metall. Deshalb bekamen die höchsten Gäste Napoleons Gerichte von Aluminiumgeschirr serviert. Sonstige Gäste mussten sich mit Tellern aus Silber und Gold begnügen.

² Das Washington Monument (Washington, D.C., USA) ist ein 169,3 m hoher Marmorturm, welcher im Jahr 1884 fertiggestellt wurde und bis heute das höchste Steinbauwerk der Welt ist. Die als Teil des Blitzableitersystems ausgebildete 22 cm hohe Spitze des Monuments besteht aus 2,835 kg (100 oz) reinem Aluminium; einfach weil man es konnte.

Tab. 1.1 Ausgewählte Kennwerte des Aluminiums. Nach: A.M. Russell und K.L. Lee. *Structure-property relations in nonferrous metals*. Wiley VCH, 2005.

Aluminium (Al)	
Valenz: +3	Kristallstruktur: fcc ^{a)} (Raumgruppe: $Fm\bar{3}m$) $a = 0,4047 \text{ nm}$
Dichte:	2,7 g/cm ³
Schmelztemperatur:	660 °C
thermische Leitfähigkeit:	237 W/mK
Elastizitätsmodul:	70 GPa
thermischer Ausdehnungskoeffizient:	23,1 μm/mK
elektrischer Widerstand:	2,65 μΩ cm
Preis:	1,86 €/kg

a) engl. fcc = face centred cubic, deutsch kfz = kubisch flächenzentriert.

das Spektrum ausgewählter Metalle ein. Aluminium verfügt demzufolge über eine sehr geringe Dichte von nur 2,7 g/cm³, wodurch es insbesondere als Basis von Werkstoffen für den strukturellen Leichtbau gerne verwendet wird, allerdings ist dabei der vergleichsweise geringe Elastizitätsmodul zu berücksichtigen. Ebenso beachtenswert ist die Schmelztemperatur von Aluminium. Diese beträgt 660 °C, wodurch deutlich wird, dass Aluminium und Aluminiumlegierungen wohl eher nicht bei hohen Temperaturen zum Einsatz kommen. Trotz dieser unzureichenden Eigenschaften sind Aluminium und Aluminiumlegierungen gegenwärtig die wichtigsten Nichteisenmetalle. Dies liegt neben der geringen Dichte an der guten