

Inhaltsverzeichnis

1.	Aluminium – Bedeutung und Gewinnung	1
1.1	Produktion und Verbrauch von Aluminium	1
1.2	Gewinnung von Aluminium	19
1.2.1	Primäraluminium	19
1.2.1.1	Grundlagen	19
1.2.1.2	Rohstoffe	21
1.2.1.3	Gewinnung von Aluminiumoxid	23
1.2.1.4	Erzeugung von Primäraluminium	29
1.2.2	Reinstaluminium	38
1.2.3	Sekundäraluminium – Recycling	39
1.2.3.1	Knetlegierungen	42
1.2.3.2	Gusslegierungen	43
1.2.4	Aluminium-Vorlegierungen	44
1.3	Lieferformen	44
1.3.1	Masseln	44
1.3.1.1	Masseln aus unlegiertem Aluminium	44
1.3.1.2	Masseln aus Aluminiumlegierungen	45
1.3.2	Granalien, Grieß, Pulver	45
1.3.3	Formate	45
1.3.4	Flüssigaluminium	47
1.4	Herstellung des Vormaterials für die Halbzeugfertigung	47
1.4.1	Schmelzflüssiges Aluminium	47
1.4.1.1	Schmelzen	47
1.4.1.2	Gießen	48
1.4.1.3	Temperaturmessungen	48
1.4.2	Walz- und Pressbarren (Formate)	49
1.4.2.1	Vertikalstranggießen	49
1.4.2.2	Horizontalstranggießen	52
1.4.2.3	Bearbeiten der Barren	52
1.4.3	Bänder, Drähte	53
1.4.3.1	Gießwalzen	57
1.4.3.2	Gießen zwischen Stahlbändern	58
1.4.3.3	Gießen zwischen umlaufenden Raupenkokillen	58
1.4.3.4	Kontinuierliches Drag-Casting	61
1.4.3.5	Gießen zwischen Rad oder Walze und Stahlband	62
1.5	Halbzeugähnliche Spezialerzeugnisse	64
1.5.1	Profile aus Rohren und Bändern	64
1.5.2	Sondererzeugnisse für Wärmeaustauscher	66
1.5.3	Wärme gedämmte Verbundprofile	68
	Literatur	70

2.	Eigenschaften von reinem Aluminium	81
2.1	Physikalische Eigenschaften	82
2.1.1	Dichte	84
2.1.2	Wärmeausdehnungskoeffizient	85
2.1.3	Spezifische Wärme	85
2.1.4	Elastizitätseigenschaften	85
2.1.5	Elektrische Leitfähigkeit	86
2.1.6	Wärmeleitfähigkeit	90
2.1.7	Verhalten im Magnetfeld	91
2.1.8	Kernphysikalische Eigenschaften	91
2.1.9	Reibungseigenschaften	91
2.1.10	Optische Eigenschaften	92
2.2	Mechanische Eigenschaften	99
	Literatur	100
3.	Zustandsdiagramme der Aluminiumlegierungen	103
3.1	Aluminiumlegierungen	103
3.2	Bedeutung des Zustandsschaubildes	103
3.3	Zustandsschaubilder des Aluminiums	108
3.3.1	Binäre (Zweistoff-) Systeme	108
3.3.1.1	Aluminium-Silizium	108
3.3.1.2	Aluminium-Kupfer	110
3.3.1.3	Aluminium-Magnesium	112
3.3.1.4	Aluminium-Mangan	113
3.3.1.5	Aluminium-Eisen	114
3.3.1.6	Aluminium-Lithium	115
3.3.1.7	Aluminium-Zink	116
3.3.1.8	Aluminium-Titan	116
3.3.1.9	Weitere binäre Systeme	117
3.3.2	Ternäre (Dreistoff-) Systeme	120
3.3.2.1	Aluminium-Eisen-Silizium	120
3.3.2.2	Aluminium-Magnesium-Silizium	123
3.3.2.3	Aluminium-Kupfer-Magnesium	124
3.3.2.4	Aluminium-Kupfer-Silizium	126
3.3.2.5	Aluminium-Zink-Magnesium	126
3.3.2.6	Aluminium-Mangan-Eisen	128
3.3.2.7	Aluminium-Magnesium-Lithium	130
3.3.2.8	Aluminium-Kupfer-Lithium	130
3.3.2.9	Aluminium-Titan-Vanadium	130
3.3.3	Höhere Systeme	131

3.3.3.1	Aluminium-Kupfer-Eisen-Magnesium	131
3.3.3.2	Aluminium-Kupfer-Eisen-Mangan	131
3.3.3.3	Aluminium-Kupfer-Eisen-Silizium	131
3.3.3.4	Aluminium-Kupfer-Magnesium-Mangan	131
3.3.3.5	Aluminium-Kupfer-Magnesium-Silizium	131
3.3.3.6	Aluminium-Kupfer-Magnesium-Zink	131
3.3.3.7	Aluminium-Kupfer-Mangan-Silizium	131
3.3.3.8	Aluminium-Mangan-Eisen-Silizium	132
3.3.3.9	Aluminium-Mangan-Eisen-Magnesium	132
3.3.3.10	Aluminium-Magnesium-Eisen-Silizium	133
3.3.3.11	Aluminium-Magnesium-Mangan-Silizium	133
3.3.3.12	Aluminium-Magnesium-Mangan-Eisen-Silizium	133
3.3.3.13	Aluminium-Lithium-Kupfer-Magnesium (Zirkon)	133
3.4.	Ungleichgewichtsschaubilder	134
3.4.1	System Al-Si	135
3.4.2	System Al-Mn	135
3.4.3	System AlFe	135
	Literatur	137
4.	Aufbau der Aluminiumlegierungen	143
4.1	Aufbau der naturharten Aluminium-Knetwerkstoffe	144
4.1.1	AlFeSi und Reinaluminium (Reihe 1xxx)	145
4.1.2	AlMn-Knetlegierungen (Reihe 3xxx)	145
4.1.3	AlMg- und AlMgMn-Knetlegierungen (Reihe 5xxx)	147
4.1.4	AlSi-Knetlegierungen (Reihe 4xxx)	150
4.2	Aushärtbare Aluminiumknetlegierungen	150
4.2.1	AlMgSi-Knetlegierungen (Reihe 6xxx)	150
4.2.2	AlCuMg- und AlCuSiMn-Knetlegierungen (Reihe 2xxx)	153
4.2.3	AlZnMg-Knetlegierungen (Reihe 7xxx)	156
4.2.4	AlZnMgCu-Knetlegierungen (Reihe 7xxx)	157
4.2.5	Aluminium-Knetlegierungen mit Pb (z.B. Reihen 2xxx, 6xxx)	159
4.3	Sonstige Aluminium-Knetlegierungen (Reihe 8xxx)	159
4.4	Aufbau der Aluminium-Gusswerkstoffe	160
4.4.1	AlSi-Gusslegierungen (Reihe 44xxx)	160
4.4.2	AlSiMg-Gusslegierungen (Reihen 42xxx und 43xxx)	162
4.4.3	AlSiCu-Gusslegierungen (Reihen 45xxx und 46xxx)	165
4.4.4	AlMg-Gusslegierungen	168
4.4.5	AlCuTi-Gusslegierungen	170
4.4.6	AlZnMg-Gusslegierungen (Reihe 71xxx)	172
4.4.7	Weitere Aluminium-Gusslegierungen	173
	Literatur	188

5.	Eigenschaften von Aluminium-Legierungen	195
5.1	Mechanische Eigenschaften	197
5.1.1	Härte	197
5.1.2	Festigkeit im Zugversuch	198
5.1.3	Druck-, Biege-, Scher- und Torsionsfestigkeit	201
5.1.4	Festigkeitseigenschaften bei höheren Temperaturen	203
5.1.4.1	Übersicht	203
5.1.4.2	Anlassbeständigkeit	204
5.1.4.3	Warmfestigkeitseigenschaften im Kurzzeitversuch	208
5.1.4.4	Zeitstandverhalten, Kriechen	212
5.1.5	Festigkeitseigenschaften bei tiefen Temperaturen	215
5.1.6	Dauerfestigkeit	221
5.1.6.1	Grundbegriffe	221
5.1.6.2	Einfluss des Werkstoffzustandes	223
5.1.6.3	Einfluss der Beanspruchung	229
5.1.6.4	Einfluss von Spannungsspitzen (Kerbwirkung)	231
5.1.6.5	Einfluss von Oberflächenzustand und Umgebung	235
5.1.6.6	Einfluss des Schweißens	235
5.1.6.7	Einfluss der Temperatur	238
5.1.7	Festigkeit bei schlagartiger Beanspruchung	241
5.2	Bruchverhalten	241
5.2.1	Bruchmechanik	241
5.2.2	Bruchmechanische Kennwerte	243
5.2.3	Andere Kenngrößen	246
5.3.	Technologische Eigenschaften	247
5.3.1	Abriebfestigkeit	247
5.3.2	Blechumformbarkeit	248
5.3.3	Umformbarkeit bei Strangpress- und Ziehprodukten	252
5.3.4	Spanbarkeit	252
5.4	Physikalische Eigenschaften	254
5.4.1	Überblick	254
5.4.2	Dichte	256
5.4.3	Wärmeausdehnungskoeffizient	257
5.4.4	Spezifische Wärme	258
5.4.5	Elastizitätseigenschaften	258
5.4.6	Dämpfungseigenschaften	260
5.4.7	Elektrische Leitfähigkeit	261
5.4.8	Wärmeleitfähigkeit	266
5.4.9	Verhalten im Magnetfeld	267
5.4.10	Kernphysikalische Eigenschaften	268
5.4.11	Reibungseigenschaften	270
5.4.12	Optische Eigenschaften	272
	Literatur	273

6.	Beeinflussung der Eigenschaften durch thermische und mechanische Behandlung	287
6.1	Grundlagen	287
6.2	Verfestigung	295
6.3	Entfestigung	301
6.3.1	Erholung	303
6.3.2	Rekristallisation	306
6.3.2.1	Einfluss des Umformgrades	306
6.3.2.2	Einfluss von Begleitelementen	309
6.3.2.3	Einfluss des Gießverfahrens	310
6.3.2.4	Einfluss der thermisch-mechanischen Vorgeschichte	310
6.4	Weichglühen, Stabilisieren	313
6.5	Entspannungsglühen	313
6.6	Hochglühen, Homogenisieren	315
6.7	Aushärten	316
6.7.1	Lösungsglühen	316
6.7.2	Abschrecken	321
6.7.3	Auslagern	322
6.7.3.1	Kaltauslagern	322
6.7.3.2	Warmauslagern	324
6.7.3.3	Überalterung	324
6.7.4	Rückbildung	324
6.8	Einfluss des Umformens auf das Aushärtungsverhalten	325
6.8.1	Kaltumformen und Kaltaushärten	326
6.8.2	Kaltumformen und Warmaushäerten	329
6.9	Aushärtungsverhalten verschiedener Knetwerkstoffe	329
6.9.1	AlCuMg, AlCuSiMn	330
6.9.2	AlMgSi	334
6.9.3	AlZnMg	339
6.9.4	AlZnMgCu	343
6.10	Aushärtungsverhalten verschiedener Gusslegierungen	345
6.11	Überlagerung von Entfestigungs- und Ausscheidungsprozessen	348
6.11.1	Reinaluminium [1xxx]	351
6.11.2	Aluminiumlegierungen	354
	Literatur	359

7.	Werkstoffentwicklungen	373
7.1	Pulvermetallurgisch hergestellte Aluminiumwerkstoffe	373
7.1.1	Verfahrenstechnik	375
7.1.1.1	Pulverherstellung	376
7.1.1.2	Aufbereitung der Pulver	380
7.1.1.3	Formgebung der Pulver	383
7.1.2	Systematik von PM-Werkstoffen	391
7.1.3	Eigenschaften von Aluminiumbasis-PM-Werkstoffen	392
7.1.3.1	Sinterformteile aus Aluminium	392
7.1.3.2	Gesinterte Lagerbuchsen	394
7.1.3.3	Ausscheidungs- und dispersionsgehärtete Aluminiumwerkstoffe	395
7.2	Aluminium-Verbundwerkstoffe, MMC	403
7.2.1	Künstliche faser- und teilchenverstärkte Aluminiumverbundwerkstoffe ..	405
7.2.1.1	Verstärkungskomponenten für MMC auf Aluminiumbasis	408
7.2.1.2	Herstellung von MMC´s	411
7.2.1.3	Eigenschaften und Anwendungsbeispiele von MMC	419
7.2.2	»Natürliche« Faserverbundwerkstoffe (Eutektika)	426
7.3	Werkstoffverbunde	430
7.3.1	Verbundhalbzeug aus Aluminium mit Metallen	430
7.3.1.1	Aluminium - Aluminium	430
7.3.1.2	Stahl - Aluminium	431
7.3.1.3	Aluminium-Stahl	433
7.3.1.4	Aluminium-Kupfer	433
7.3.1.5	Kupferplattierte Aluminiumdrähte und -stangen	433
7.3.1.6	Stahlplattierte Aluminium-Strangpressprofile	434
7.3.1.7	Sonstiges metallplattiertes Aluminiumhalbzeug	436
7.3.2	Verbundelemente aus Aluminium und anderen Metallen	436
7.3.3	Verbundhalbzeug aus Aluminium und Nichtmetallen	436
7.3.3.1	Aluminium-Holz, -Papier, -Karton	437
7.3.3.2	Aluminium-Kunststoff/Textilien	437
7.3.3.3	Körperschallgedämpfte Aluminiumbänder / Farbaluminium	437
7.3.4	Sandwich-Bauelemente	438
7.3.4.1	Sandwich-Bauelemente für geringere Beanspruchung	438
7.3.4.2	Sandwich-Bauelemente für hohe Beanspruchung	439
7.4	Aluminium-Lithium-Legierungen	440
7.5	Aluminiumschäume	446
7.5.1	Schaumherstellung	446
7.5.2	Verarbeitung von Metallschäumen	449
7.5.3	Eigenschaften	452
7.5.4	Anwendung von Aluminiumschäumen	454
7.6	Aluminide	455
	Literatur	457

8.	Chemisches Verhalten von Aluminium	477
8.1	Aluminiumoberfläche	478
8.1.1	Bildung von Oxid- und Deckschichten unter Umgebungseinfluss	480
8.1.1.1	Natürliche Oxidschichten an Luft	480
8.1.1.2	Oxidische Deckschichten unter Witterungseinfluss	481
8.1.1.3	Deckschichten durch Leitungs- oder Naturwässer	482
8.1.2	Verstärkung der natürlichen Oxidschicht	483
8.2	Korrosion	484
8.2.1	Grundlagen	484
8.2.2	Einflüsse auf die Korrosion	486
8.2.2.1	Legierungselemente, Beimengungen	486
8.2.2.2	Thermische oder mechanische Behandlungen	487
8.2.2.3	Oberflächenbeschaffenheit	489
8.2.3	Begriffe, Korrosionsarten	489
8.2.3.1	Begriffe	489
8.2.3.2	Korrosion ohne mechanische Beanspruchung	490
8.2.3.3	Korrosion unter mechanischer Beanspruchung	503
8.2.4	Korrosionsschutz	514
8.2.4.1	Deckschicht	514
8.2.4.2	Oberflächenschutz	514
8.2.4.3	Inhibitoren	514
8.3	Chemisches Verhalten gegenüber anderen Stoffen	515
8.3.1	Stoffe und Verhalten	515
8.3.2	Prüfen der chemischen Beständigkeit	544
8.3.2.1	Prüfmethodik	544
8.3.2.2	Prüfverfahren	546
8.3.3	Gesundheitliche Unbedenklichkeit	548
	Literatur	550

9.	Werkstoffbezeichnungen nach Legierungszusammensetzungen und mechanischen Kennwerten	565
9.1	Werkstoffbezeichnungen	566
9.1.1	Begriff »Aluminium«	566
9.1.2	Bezeichnung nach Herkunft oder Reinheit	566
9.1.3	Bezeichnungen nach Verarbeitung oder Lieferform	567
9.1.3.1	Knetwerkstoffe EN AW	567
9.1.3.2	Gusswerkstoffe EN AC	567
9.1.3.3	Vorlegierungen EN AM	568
9.1.3.4	Blockmetalle EN AB	568
9.1.4	Legierungsbezeichnungen nach chemischer Zusammensetzung bzw. Nummernkombinationen	568
9.1.4.1	Bezeichnung nach chemischer Zusammensetzung	568
9.1.4.1.1	Knetlegierungen EN AW	568
9.1.4.1.2	Gusslegierungen EN AC	570
9.1.4.1.3	Vorlegierungen EN AM	570
9.1.4.1.4	Blockmetalle EN AB	571
9.1.4.2	Bezeichnungen nach Nummernkombinationen	571
9.1.4.2.1	Knetlegierungen EN AW	571
9.1.4.2.2	Gusslegierungen EN AC	573
9.1.4.2.3	Vorlegierungen EN AM	574
9.1.4.2.3	Blockmetalle EN AB	575
9.1.5	Bezeichnung der Werkstoffzustände	575
9.1.5.1	Aluminiumknetlegierungen	576
9.1.5.2	Gusslegierungen	580
9.1.6	Bezeichnung nach der Aushärtbarkeit	580
9.1.7	Bezeichnung nach der Anwendung	581
9.1.8	Werkstoffauswahl für Sondereinsatzzwecke	581
9.2	Genormte mechanische Werkstoffkennwerte	582
9.2.1	Normenübersicht	582
	Literatur	588

Tafel A.24	Physikalische und chemische Zahlenwerte von Elementen und Oxiden	742
Tafel A.25	Periodensystem der Elemente mit den auf $12\text{C} = 12.000$ bezogenen relativen Atommassen (1997)	744
Tafel A.26	Nützliche Kontakt-Adressen	745
Stichwortverzeichnis		751