

Inhalt

1 Einführung: Bedeutung, Märkte, Rohstoffe	1
1.1 Aluminium verstehen	1
1.2 Primäraluminium	5
1.2.1 Vorkommen, Bauxiterze	5
1.2.2 Gewinnungsprozeß	7
1.3 Sekundäraluminium	12
1.4 Versorgungslage in Deutschland	13
2 Erzeugnisformen für die Aluminiumanwendung	15
2.1 Übersicht	15
2.2 Gußfabrikate	16
2.2.1 Gußwerkstoffe	16
2.2.2 Gießverfahren	16
2.2.3 Anwendungsbeispiele	18
2.2.4 Gebrauchstauglichkeit	22
2.3 Walzhalbzeuge	23
2.4 Preß- und Ziehfabrikate	28
2.4.1 Stranggepreßte und gezogene Halbzeuge	28
2.4.2 Freiform- und Gesenkschmiedeteile	30
2.4.3 Kaltfließpreßteile aus Aluminium	31
2.5 Oberflächenbeschichtete Halbfabrikate	31
2.6 Verbundhalbzeuge	34
2.7 Granalien, Grieß und Pulver	37
2.7.1 Herstellung von Granalien, Grieß, Pulver und Pasten	37
2.7.2 Anwendungen von Pulver und Grieß ohne pulvermetallurgische Verarbeitung	40
2.7.3 Sicherheitsvorkehrungen in der Pulverhandhabung	42
2.8 Aluminiumschäume	42
2.8.1 Metallschaumherstellung	42
2.8.2 Eigenschaftsspektrum metallischer Schäume	43
3 Legierungskonstitution und Wärmebehandlung	45
3.1 Gefügebausteine	45
3.2 Verformungsverfestigung durch Versetzungen	47
3.3 Mischkristallverfestigung	51
3.4 Ausscheidungshärtung	53
3.5 Wärmebehandlung	59
3.5.1 Entfestigungsglühen	59
3.5.2 Weichglühen	60
3.5.3 Aushärten	61

3.6	Normengerechte Bezeichnung von unlegiertem und legiertem Aluminium	69
3.6.1	Numerisches Bezeichnungssystem der Legierungszusammensetzung	69
3.6.2	Bezeichnungssystem für Knetlegierungen	70
3.6.3	Bezeichnung der Werkstoffzustände für Knetlegierungen	70
3.6.4	Bezeichnungssystem für Gußstücke	72
3.6.5	Zuordnung der Gießverfahren	73
3.6.6	Bezeichnung der Werkstoffzustände für Gußstücke	74
3.6.7	Halbzeugnormen	74
3.6.8	Garantierte Eigenschaften	75
4	Physikalische und mechanische Eigenschaften	77
4.1	Physikalische Eigenschaften	77
4.1.1	Atom- und Kristallstruktur	77
4.1.2	Dichte	78
4.1.3	Elektrische Leitfähigkeit	78
4.1.4	Magnetische Eigenschaften	79
4.1.5	Wärmeleitfähigkeit	79
4.1.6	Reflexions- und Emissionseigenschaften	80
4.1.7	Physikalische Eigenschaftswerte von Reinaluminium und Aluminiumlegierungen	81
4.2	Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur	83
4.2.1	Bruchverhalten von Aluminiumlegierungen	83
4.2.2	Festigkeitseigenschaften bei Raumtemperatur	89
4.3	Mechanische Eigenschaften bei tiefen Temperaturen	89
4.4	Mechanische Eigenschaften bei höheren Temperaturen	91
4.5	Schwingfestigkeit	94
4.5.1	Allgemeines Schwingfestigkeitsverhalten von Aluminium	94
4.5.2	Schwingfestigkeitsbruch (Ermüdungsbruch)	101
5	Korrosionsverhalten von Aluminium	105
5.1	Allgemeine Grundlagen der Korrosion von Metallen	105
5.1.1	Einflußfaktoren auf das Korrosionsverhalten	105
5.1.2	Korrosionsverhalten von Aluminium	107
5.1.3	Korrosionsmechanismus	109
5.1.4	Freie und kritische Korrosionspotentiale	111
5.1.5	Stromdichte-Potentialkurven	112
5.2	Oxidschicht des Aluminiums	113
5.2.1	Aufbau und Bedeutung	113
5.2.2	Beständigkeit der Oxidschicht	115
5.3	Einfluß der Legierungselemente auf das chemische Verhalten ...	116
5.3.1	Bedeutung der Gefügestruktur	116
5.3.2	Korrosionsbeständigkeit der wichtigsten Legierungen ..	117

5.4	Erscheinungsformen der Korrosion bei Aluminium und seinen Legierungen	119
5.4.1	Lochkorrosion (LK)	119
5.4.2	Selektive Korrosion (SK)	120
5.4.3	Spannungsrißkorrosion (SpRK)	123
5.4.4	Interkristalline Korrosion unter Spannung	125
5.4.5	Spaltkorrosion	126
5.4.6	Kontaktkorrosion	129
5.4.7	Reibkorrosion	132
5.4.8	Filiformkorrosion	133
5.5	Beispiele für korrosionsgerechtes Konstruieren	133
6	Umformtechnische Grundlagen	139
6.1	Definitionen und Begriffe	139
6.2	Grundgrößen und Grundgesetze der Umformung	141
6.3	Fließbedingungen (Fließhypothesen)	145
6.3.1	Schubspannungshypothese	145
6.3.2	Vergleichsformänderung φ_g	146
6.3.3	Gestaltänderungsenergiehypothese (von MISES)	147
6.3.4	Fließortkurven	147
6.3.5	Fließgesetz	149
6.3.6	Fließkurve	149
6.4	Fließverhalten von Aluminium	149
6.4.1	Fließkurven bei der Kaltumformung	149
6.4.2	Verfestigungsexponent n	150
6.4.3	Warmfließkurven	150
6.4.4	Mittlere Fließspannung	152
6.5	Umformarbeit	152
6.5.1	Ideelle Umformarbeit	153
6.5.2	Gesamtarbeit (effektive Umformarbeit)	153
6.5.3	Umformwirkungsgrad η_F	153
6.5.4	Wärmeentwicklung beim Umformen	154
7	Walzen von Aluminium	155
7.1	Walzprozeß	155
7.1.1	Warmwalzen	155
7.1.2	Bandgießen	157
7.1.3	Kaltwalzen	157
7.2	Qualitätsmerkmale von Warm- und Kaltwalzblechen und -bändern	158
7.2.1	Planlage	158
7.2.2	Oberflächenbeschaffenheit	161
7.2.3	Gefüge	162

8 Strangpressen von Aluminium	163
8.1 Strangpreßverfahren	164
8.2 Grundformen von Profilen und Werkzeugen	167
8.3 Strangpreßbarkeit von Aluminiumlegierungen	168
8.4 Prozeßablauf im Strangpreßwerk	173
8.5 Strangpreßgerechte Profil- und Werkzeuggestaltung	176
8.6 Gestalten von Strangpreßprofilen	178
8.6.1 Funktionalitätsgruppen	178
8.6.2 Konstruktionen mittels Profilverbindungen	181
8.7 Verarbeitung von Strangpreßprofilen	183
8.7.1 Spanende Bearbeitung	184
8.7.2 Fließlochbohren	184
8.7.3 Profilbiegen	184
8.7.4 Biegeverfahren	188
8.7.5 Grenzen des Profilbiegens	190
8.8 Sonderv Verfahren des Strangpressens von Aluminium	193
8.8.1 Strangpressen nach dem „Conform“-Verfahren	193
8.8.2 Hydrostatisches Strangpressen	194
8.8.3 Verbundstrangpressen	194
9 Schmieden von Aluminium	195
9.1 Charakteristische Merkmale von Schmiedeteilen	195
9.2 Schmiedelegerungen	197
9.2.1 Vorzugslegierungen und Einsatzgebiete	197
9.2.2 Schmiedegefüge	199
9.2.3 Schmiedetemperaturen und Gesenktemperaturen	200
9.2.4 Umformgeschwindigkeiten	201
9.2.5 Einfluß von Temperatur und Umformgeschwindigkeit auf die Fließspannung	202
9.2.6 Warmfließkurven	202
9.2.7 Reibung und Schmierung	204
9.2.8 Wärmebehandlung	206
9.2.9 Arbeitsablauf beim Schmieden	207
9.3 Formgebung durch Schmieden	207
9.3.1 Grundverfahren des Schmiedens	208
9.3.2 Verfahren des Gesenkschmiedens im engeren Sinne (Gesenkformen)	211
9.3.3 Zusammenfassung der charakteristischen Merkmale	212
9.4 Schmiedegesenke	213
9.4.1 Gestaltung von Schmiedegesenken	213
9.4.2 Gesenkeinsätze	214
9.4.3 Versagenserscheinungen an Schmiedegesenken	215
9.4.4 Teilungen von Schmiedegesenken	215
9.4.5 Stofffluß und Faserverlauf	216

9.5	Gestalten von Schmiedeteilen	220
9.5.1	Toleranzen für Aluminium-Schmiedeteile	220
9.5.2	Gestaltungsregeln für Aluminium-Schmiedeteile	221
9.5.3	Vermeiden konstruktiver Kerben	225
10	Kaltfließpressen von Aluminium	227
10.1	Charakteristische Merkmale von Aluminium-Kaltfließpreßteilen	227
10.2	Legierungen für technische Fließpreßteile	230
10.2.1	Vormaterial: Butzen	230
10.2.2	Ausgangszustände für das Kaltfließpressen	232
10.2.3	Grenzen der Kaltumformbarkeit	239
10.2.4	Kraftbedarf beim Kaltfließpressen	240
10.3	Fließpreßverfahren	241
10.3.1	Verfahrensablauf der Grundverfahren	242
10.3.2	Verfahrenskombinationen	251
10.4	Werkzeuge für das Kaltfließpressen	254
10.4.1	Werkzeugaufbau	255
10.4.2	Gestaltung von Stempeln	255
10.4.3	Gestaltung von Preßbüchsen	256
10.4.4	Werkzeugbeispiel	258
10.4.5	Werkzeugwerkstoffe	260
10.5	Fertigungsgenauigkeit	261
10.6	Gestalten von Kaltfließpreßteilen	264
10.7	Anhang: Torsionsfließkurven von Aluminiumlegierungen	267
11	Formgießen von Aluminiumlegierungen	277
11.1	Gießverfahren	277
11.1.1	Übersicht über die Aluminiumgießverfahren	277
11.1.2	Sandguß	278
11.1.3	Cosworth-Sandguß	280
11.1.4	Niederdruck-Sandguß	280
11.1.5	Vollformguß	280
11.1.6	Feinguß	282
11.1.7	Kokillenguß	282
11.1.8	Niederdruck-Kokillenguß	283
11.1.9	Gegendruck-Kokillenguß	285
11.1.10	Druckguß	285
11.1.11	Direktes Squeeze-Casting	286
11.1.12	Indirektes Squeeze-Casting	287
11.1.13	PORAL	289
11.1.14	Pore-Free-Verfahren	289
11.1.15	VACURAL-Druckguß	289
11.1.16	Thixo-Casting	290
11.2	Aluminium-Gußlegierungen	293

11.2.1	Spanbarkeit	294
11.2.2	Schweißbarkeit	294
11.2.3	Anodisierbarkeit	295
11.2.4	Korrosionsverhalten	295
11.2.5	Festigkeitseigenschaften	295
11.3	Schmelzequalität	297
11.3.1	Schmelzezubereitung	298
11.3.2	Wasserstoffgehalt der Schmelze	299
11.3.3	Schmelzereinigung	300
11.4	Erstarrungsprozeß	301
11.4.1	Erstarren im Gleichgewichtszustand	302
11.4.2	Erstarren im Ungleichgewichtszustand	303
11.4.3	Gefügeveredelung	306
11.4.4	Schrumpfung und Schwindung	307
11.4.5	Formfüllungsvermögen	309
11.4.6	Warmrisse	310
11.4.7	Gußteilfehler	311
11.5	Gießgerechte Gestaltung	312
12	Aluminiumblechumformung	313
12.1	Einführung in die Problemstellung der Aluminiumblechumformung	313
12.2	Umformkennwerte der Blechwerkstoffe	317
12.2.1	Umformkennwerte aus dem Flachzugversuch	318
12.2.2	Aluminiumlegierungen für Karosserieanwendungen ...	326
12.2.3	Technologische Prüfverfahren	330
12.2.4	Grenzformänderungsschaubilder	338
12.3	Tribologie	342
12.3.1	Reibzonen beim Tiefziehen	342
12.3.2	Reibungsmechanismus	343
12.3.3	Mikrotopographie der Walzoberfläche	345
12.3.4	Reibungsverhalten	346
12.3.5	Werkzeugoberfläche	349
12.3.6	Schmiermittel	350
12.3.7	Einfluß der Korngröße auf die Oberflächenwandlung ...	352
12.3.8	Einfluß der tribologischen Verhältnisse auf die Formänderungsverteilung	353
12.4	Streckziehen schwach gekrümmter Blechbauteile	355
12.4.1	Definition des Streckziehens	356
12.4.2	Verfahren des einfachen Streckziehens	356
12.4.3	Cyril-Bath-Verfahren	358
12.5	Tiefziehen	360
12.5.1	Definition des Tiefziehens	360
12.5.2	Tiefziehen mit Niederhalter	360

12.5.3	Beanspruchungszonen beim Tiefziehen	361
12.5.4	Kraft-Weg-Verlauf beim Tiefziehen	362
12.5.5	Arbeitsbereich für das Tiefziehen	363
12.6	Ziehen von Aluminium-Karosserieblechteilen	364
12.6.1	Steuerung des Materialflusses	364
12.6.2	Zieheinrichtungen	367
12.6.3	Optimierung des Arbeitsbereichs beim Ziehen	372
12.6.4	Werkzeugwerkstoff/ Beschichtung	373
12.7	Falzen	373
12.7.1	Verfahrensschritte beim Falzen	374
12.7.2	Verfahrensablauf des Abbiegens	375
12.7.3	Rückfederung beim Biegen	377
12.7.4	Versagensmechanismen beim Falzen und Biegen von Aluminium	379
12.7.5	Verfahrensablauf beim Vorfalzen	380
12.7.6	Verfahrensablauf beim Fertigfalzen	381
12.8	Sicken und Rippen	383
13	Sondergebiete der Umformtechnik des Aluminiums	387
13.1	Innenhochdruckumformen	387
13.2	Halbwarmumformen	389
13.3	Superplastische Umformung	392
13.3.1	Superplastisches Werkstoffverhalten	392
13.3.2	Mechanismus der Superplastizität	394
13.3.3	Verfahren der superplastischen Blechumformung	396
13.3.4	Superplastische Aluminiumwerkstoffe	400
14	Spanende Formgebung von Aluminium	401
14.1	Zerspanbarkeit von Aluminiumlegierungen	401
14.1.1	Definition der Zerspanbarkeit	401
14.1.2	Spanformen bei Aluminiumwerkstoffen	403
14.1.3	Oberflächen spanend bearbeiteter Aluminiumwerkstoffe	405
14.1.4	Werkzeugverschleiß bei der Aluminiumzerspanung	407
14.1.5	Schnittkräfte bei der Aluminiumzerspanung	409
14.1.6	Einteilung der Aluminiumlegierungen in Gruppen ähnlicher Zerspanbarkeit	411
14.2	Werkzeuge für die Aluminiumzerspanung	413
14.2.1	Übersicht über geeignete Schneidstoffe	413
14.2.2	Aluminiumbearbeitung mit Schnellarbeitsstahl	414
14.2.3	Aluminiumbearbeitung mit Hartmetall	415
14.2.4	Aluminiumbearbeitung mit Diamant	416
14.2.5	Allgemeine Hinweise zur Werkzeuggestaltung	417
14.2.6	Fräswerkzeuge	418
14.2.7	Bohrwerkzeuge	420

14.2.8	Sägewerkzeuge	422
14.2.9	Richtwerte für das Zerspanen von Aluminium	423
14.3	Maschinen zur Aluminiumzerspanung	425
14.3.1	Anforderungen	425
14.3.2	Antrieb und Steifigkeit	426
14.3.3	Spindelausführung	426
14.3.4	Steuerungen	427
14.3.5	Spannzeuge	428
14.3.6	Kühlschmierstoffeinrichtungen	430
14.3.7	Späneentsorgungsanlagen	431
14.3.8	Aluminiumgerechte Werkzeugmaschinen	432
15	Schweißen von Aluminiumwerkstoffen	435
15.1	Charakteristische Merkmale des Aluminiumschweißens	435
15.2	Vorbereitung und Vorsichtsmaßnahmen	438
15.2.1	Reinigen	438
15.2.2	Kantenvorbereitung	439
15.3	Schmelzschweißverfahren	441
15.3.1	Schutzgas-Lichtbogenschweißen	442
15.4	Schweißbeignung	449
15.4.1	Einfluß der Legierungskonstitution auf die Rißanfälligkeit	450
15.4.2	Prüfung und Vermeidung von Schweißbrissigkeit	451
15.5	Einfluß der Schweißwärme auf die Festigkeit der Verbindung ...	455
15.6	Schweißimperfectionen	458
15.7	Qualitätskontrolle - Prüfverfahren	462
15.7.1	Zerstörende Prüfverfahren	462
15.7.2	Zerstörungsfreie Prüfmethoden	463
15.8	Laserstrahlschweißen von Aluminium	464
15.8.1	Prinzip des Laserstrahlschweißens	465
15.8.2	Einflußgrößen beim Laserstrahlschweißen von Aluminium	466
16	Widerstandsschweißen von Aluminiumwerkstoffen	469
16.1	Punktschweißen	469
16.1.1	Verfahrensübersicht	469
16.1.2	Oberflächenvorbehandlung	473
16.1.3	Schweißmaschine	477
16.1.4	Gestaltung und Festigkeitsverhalten von Aluminiumpunktschweißverbindungen	485
16.2	Buckelschweißen	488
17	Mechanisches Fügen von Aluminium	491
17.1	Charakteristische Merkmale mechanischer Fügetechniken	491
17.2	Durchsetzfügen	495

17.3	Nieten	500
17.3.1	Vollniet	500
17.3.2	Schließringbolzen	500
17.3.3	Blindniet	501
17.3.4	Stanzniet	503
17.4	Schraubverbindungen	505
17.5	Festigkeitseigenschaften umformtechnisch gefügter Verbindungen	507
18	Sonderverfahren der Aluminiumfügetechnik	511
18.1	Reibschweißen	511
18.2	Sprengplattieren	515
18.3	Friction Stir Welding (FSW)	516
19	Oberflächenbehandlung	519
19.1	Übersicht	519
19.1.1	Gründe für Oberflächenbehandlungen	519
19.1.2	Ausgangsoberfläche	520
19.2	Reinigen, Entfetten, Beizen	521
19.2.1	Lösungsmittelentfettung	522
19.2.2	Wäßrige Reinigungsmittel	522
19.2.3	Beizen	523
19.3	Haftvermittlung für organische Beschichtungen	524
19.3.1	Konversionsschichten	524
19.3.2	Mechanische Vorbehandlung	525
19.4	Beschichtungen	526
19.4.1	Anodische Oxidation	526
19.4.2	Metallische Beschichtungen aus wäßrigen Lösungen	528
19.4.3	Verschleißfeste Oberflächen durch thermisches Spritzen	530
19.4.4	Beschichten mit organischen Stoffen (Lackieren)	530
20	Einführung in das Konstruieren mit Aluminium	533
20.1	Elastizitätsmodul und Leichtbau	533
20.2	Spannungen infolge Wärmedehnung	539
20.3	Schweißkonstruktionen	540
20.3.1	Einfluß der entfestigten Wärmeeinflußzone	540
20.3.2	Eigenspannungen in Schweißverbindungen	543
20.3.3	Gestaltung von Schweißverbindungen	546
20.4	Schwingfestigkeit von Aluminiumkonstruktionen	547
20.4.1	Dauerfeste Konstruktionen	550
20.4.2	Zeit- und betriebsfeste Konstruktionen	553
21	Aluminiumpulvermetallurgie	569
21.1	Herstellen von Legierungspulvern für die Pulvermetallurgie	569

21.2	Pulvermetallurgische (PM-)Herstellung von Halbzeug und Formteilen	572
21.2.1	Vorbereitende Schritte	573
21.2.2	Kaltverdichten	573
21.2.3	Sintern	574
21.2.4	Heißverdichten	575
21.2.5	Weiterverarbeitung	576
21.2.6	Sprühkompaktieren	576
21.3	Eigenschaften dispersionsgehärteter Aluminiumwerkstoffe	578
21.3.1	Mechanismus der Dispersionshärtung	578
21.3.2	Eigenschaften von PM-Legierungen	579
22	Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe	583
22.1	Grundlagen und Eigenschaften	583
22.2	Verarbeitungsmethoden	587
22.3	Anwendungsbeispiele	589
23	Ökologische Betrachtungen	593
23.1	Ökobilanzen	593
23.1.1	Werkstoffkreislauf des Automobils	596
23.2	Stoffbilanz und Energieverbrauch in der Aluminiumproduktion	599
23.2.1	Stoffbilanz und Energieverbrauch bei der Primäraluminiumproduktion	599
23.2.2	Stoffbilanz und Energieverbrauch bei der Umschmelzaluminiumproduktion	603
23.2.3	Energiebedarf bei der Aluminiumhalbzeugherstellung ..	604
23.3	Recycling	604
24	Fallbeispiel Schienenfahrzeugbau	609
24.1	Entwicklung aluminiumgerechter Baukonzepte	609
24.2	Werkstoffe für die Großprofiltechnik	612
24.2.1	Festigkeit von Profilwerkstoffen	612
24.2.2	Eigenschaften von Schweißverbindungen	614
24.3	Bemessungskonzepte	615
24.4	Weitere Leichtbaupotentiale	616
25	Fallbeispiel Automobilbau	619
25.1	Bedeutung des Automobilmarktes für Werkstoff und Technologie	619
25.2	Werkstofftechnisch-konstruktive Gesichtspunkte	622
25.2.1	Allgemeine konstruktive Grundsätze	622
25.2.2	Spaceframe-Baukonzepte	623
25.2.3	Blechbaukonzepte	627

25.3	Werkstoffgerechte Fertigungstechnik – Ansätze	627
25.3.1	Karosserieblechwerkstoffe	627
25.3.2	Schlüsseltechnologie Fügetechnik	630
25.4	Aluminiumwerkstofftechnik für das Fahrwerk	631
25.4.1	Halbzeuge für Räder	631
25.4.2	Halbzeuge für Fahrwerkskomponenten	632
25.5	Weitere Anwendungsgebiete für Aluminium im Fahrzeugbau ...	633
Literatur	635
Anhang	661
Sachwortverzeichnis	707