

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Friedrich Ostermann

Anwendungstechnologie Aluminium

Mit 650 Abbildungen



Springer

Dr.-Ing. Friedrich Ostermann
Aluminium Technologie-Service
Kirschenstraße 17
53340 Meckenheim

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ostermann, Friedrich:

Anwendungstechnologie Aluminium / Friedrich Ostermann.
(VDI-Buch)

ISBN 978-3-662-05789-6 ISBN 978-3-662-05788-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-05788-9

ISBN 978-3-662-05789-6

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1998

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1998

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch 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 dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Einband-Enwurf: Struve & Partner, Heidelberg

Satz: Datenkonvertierung durch MEDIO, Berlin

SPIN: 10572708 68/3020 - 5 4 3 2 1 0 - Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Erfolgreiche Aluminiumanwendungen sind werkstofftechnisch eigenständige Lösungen, keineswegs sind sie Stahlkonstruktionen in Aluminiumausführung. Diese Tatsache läßt sich mit Beispielen aus dem Schienenfahrzeug- und Automobilbau überzeugend belegen. Für die Entwicklung aluminiumgerechter Produkte bedarf es eingehender, anwendungsorientierter Werkstoffkenntnisse. Es ist deshalb nicht überraschend, wenn bahnbrechende Leichtbauinnovationen auf den genannten Gebieten zu einem großen Teil aus den technischen Marketingbemühungen der einschlägigen Werkstoffindustrie hervorgegangen sind, während bis heute die Vermittlung gründlicher Aluminiumkenntnisse in der Ingenieurausbildung eher die Ausnahme als die Regel ist.

Das Buch richtet sich daher an Maschinenbauingenieure mit der Absicht, für anwendungstechnische Aufgabenstellungen die notwendigen werkstofftechnischen Grundlagen anzubieten. Es gliedert sich in einen werkstofflichen, einen fertigungstechnischen und einen konstruktiven Teil. Darüber hinaus enthält das Buch Ausführungen zu pulvermetallurgischen Aluminiumwerkstoffen und zu Aluminiumverbundwerkstoffen, die für die industrielle Anwendung zunehmend interessant werden, sowie zu ökologischen Fragestellungen in Zusammenhang mit Werkstoffgewinnung und Recycling. Aus Gründen der Aktualität und wegen der beispielhaft werkstofftechnischen Pionierleistungen werden die Entwicklungen im Schienenfahrzeug- und Automobilbau als Fallbeispiele näher ausgeführt.

Die Konzeption des Buches bezüglich der Auswahl der Themengebiete ergab sich aus den beruflichen Erfahrungen des Verfassers mit Problemlösungen der Aluminiumanwendung. In verschiedenen Kapiteln des Buches wird auf Beiträge von einer Reihe von Kollegen aus Hochschule und Industrie zum Ausbildungswerk TALAT¹⁾ zurückgegriffen. Mein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang den Herren G. Budd †, Professor J. Campbell, R. Cobden, E. Dan-

1) Das europäische Ausbildungswerk „TALAT“ (Training in Aluminium Application Technologies, F. Ostermann (Hrsg.), zu beziehen auf CD-ROM von den nationalen Aluminiumindustrieorganisationen und von Aluminium Technologie-Service, Meckenheim) wurde mit Hilfe der Europäischen Kommission zur Förderung der Aluminiumausbildung von Maschinenbau- und Bauingenieuren in Europa entwickelt.

nenmann, Professor L. Froyden, Professor T. Höglund, Dr. P. Johnne, Professor D. Kosteas, Professor U. Krüger, Dr. B. Leuschen, S. Lundberg, Å. Oma, Professor K. Siegert, Professor S. Støren, Professor B. Verlinden und A. R. Woodward. Für die Erlaubnis, europäisch harmonisierte Werkstoffdaten der EAA-Datenbank ALUSELECT zu verwenden, danke ich der European Aluminium Association.

Große Teile des Buches wurden zunächst als begleitende Skripte zur Vorlesung „Anwendungstechnologie Aluminium“ konzipiert, die der Verfasser auf Initiative des Fachbereichs Maschinentechnik an der Universität-GH Paderborn hält. Das umfangreiche Bildmaterial beruht auf Vorlagen für Projektionsfolien, die möglichst faßlich ausgeführt sind. Dadurch können die textlichen Erläuterungen knapp gehalten werden. Aus didaktischen Gründen wird stellenweise auf werkstoffübergreifende Grundlagen eingegangen, ohne daß diese aber erschöpfend dargestellt sind. Hierzu wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen. Das Interesse der Studierenden an den Vorlesungen sowie an den abschließenden Prüfungen bestätigt die Bedeutung der Buchthematik im Hinblick auf die beruflichen Karrieren junger Maschinenbauingenieure.

Ich hoffe, daß das Buch Lehrenden, Lernenden und den bereits im Beruf stehenden Ingenieuren Anregung und Hilfestellung gibt und zu einer breiteren werkstofftechnischen Ausbildung an den Hochschulen sowie zu intensiveren Forschungsaktivitäten bei der weiteren Entwicklung der Aluminiumanwendungstechnologie beiträgt.

In seinem zeitkritischen Werk²⁾ weist der Historiker Arnulf Baring darauf hin, daß zwar die forschungsfundierte Aluminiumindustrie ohne wesentlichen Beitrag von Hochschulforschung entstanden ist, die enorme Entwicklung anderer Branchen der deutschen Industrie nach der Jahrhundertwende aber eindeutig auf die intensive Kooperation zwischen Wirtschaft und Hochschulforschung zurückzuführen ist. Angesichts der strukturellen Veränderungen in der deutschen Aluminiumindustrie in jüngster Zeit ist es heute und in Zukunft deshalb um so notwendiger, daß sich die Hochschulforschung gemeinsam mit der aluminiumherstellenden und -verarbeitenden Industrie der aktuellen Fragestellungen stärker annimmt, wenn Deutschland auch weiterhin das europäische Land mit dem am höchsten entwickelten Stand der Aluminiumanwendungstechnologie bleiben soll.

Mein herzlicher Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen, die durch Informationen, Diskussionen und bereitgestelltes Bildmaterial zu diesem Buch beigetragen haben, sowie meiner Familie und meinen Freunden für ihre Geduld, Ermunterung und Unterstützung.

Friedrich Ostermann
Meckenheim, im April 1998

2) Arnulf Baring: Scheitert Deutschland? Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1997, S. 18

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 Entfestigungsglügen	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 Sonderverfahren 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	Cyrl-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 Schweißrissigkeit	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 Prüfmethode	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 Fügeverfahren	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	Eigenstressungen 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

1 Einführung: Bedeutung, Märkte, Rohstoffe

1.1 Aluminium verstehen

Seit den Anfängen der industriellen Produktion von Aluminium vor wenig mehr als 100 Jahren ist dieser Werkstoff nach Stahl zum wichtigsten Gebrauchsmetall in unserer Industriegesellschaft geworden. In der ersten Hälfte des Jahrhunderts wurde die Bedarfsentwicklung dieses Leichtbauwerkstoffs wesentlich durch die strategische Bedeutung für militärische und zivile Luftfahrtanwendungen bestimmt. Längst ist jedoch dieser Verwendungszweck infolge des rapide gewachsenen Bedarfs der zivilen Investitions- und Konsumgüterindustrie, die heute mehr als 99% der gesamten Aluminiumproduktion aufnimmt, unbedeutend geworden. Bild 1.1.1 illustriert das Wachstum der Aluminiumproduktion in der westlichen Welt in den vergangenen 100 Jahren [1.1].

Der offensichtliche Grund für die rasante Verbrauchsentwicklung sind die vielseitigen Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften, durch die sich Alumi-

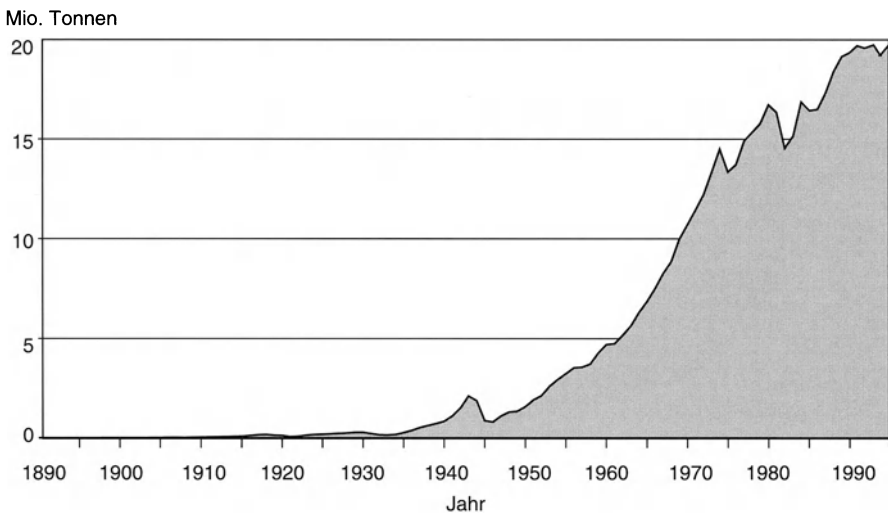


Bild 1.1.1. Entwicklung der Produktion von Primäraluminium in der westlichen Welt [1.1]

Tabelle 1.1.1. Vorteilhafte Gebrauchseigenschaften von Aluminium

geringes spezifisches Gewicht	1/3 so hoch wie Stahl
zahlreiche Herstellungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten	Gießen, Walzen bis zu 5 mm Dicke, Strangpressen, Schmieden, Fließpressen, Ziehen
Formgebungsmöglichkeiten	Spanen, Tiefziehen, Streckziehen, Biegen, Stanzen u.a.
Korrosionsbeständigkeit	durch Anodisieren und Beschichten noch zu verbessern
großes Festigkeitsspektrum	von 70 bis 700 N/mm ²
ungiftig Lebensmittel	verwendbar als Verpackungstoff für
elektrische Leitfähigkeit	2x so hoch wie Kupfer, wenn bezogen auf das gleiche Gewicht
Wärmeleitfähigkeit	3x so hoch wie Eisen bzw. 55% von Kupfer

nium gegenüber anderen Gebrauchsmetallen auszeichnet. Hierzu zählen z.B. die Eigenschaften in Tabelle 1.1.1.

Die wichtigen Märkte von gestern und heute, s. Bild 1.1.2, sind wohl auch die Märkte von morgen, wobei die Bedeutung des Transportsektors insgesamt und der Anwendungsbereich Automobil speziell zunehmen werden. Ohne Zweifel geht es auf allen Märkten um die Wahrung der Position der dominierenden Werkstoffgruppen, so daß weitere Substitutionen nur gegen äußerste Widerstände erkämpft werden können. Hierbei werden die Entwicklung und Beherrschung des „gewußt-wie“ eine entscheidende Rolle spielen.

Der britische Architekt Sir Norman Foster soll bei der Vorstellung eines seiner bekannten Projekte – der Hongkong Bank – auf die Frage „warum Aluminium?“

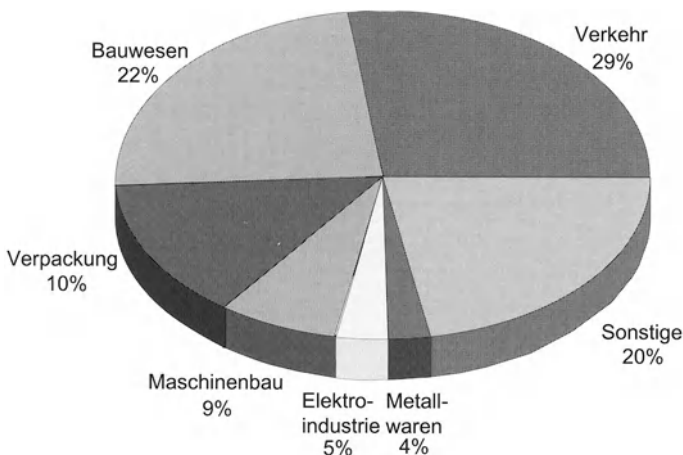


Bild 1.1.2. Endverbrauch von Aluminiumhalbzeugen, Formguß, Folie und Pulver in Deutschland (Quelle: EAA, 1995)

geantwortet haben: „I don't know of any other material which could have done the job quite as nicely“. Architektonische Meisterwerke in Vollendung sind immer eine Harmonie aus Form, Funktion und Material. Um diese Harmonie zu erreichen, bedarf es nicht nur der gestalterischen Meisterschaft, sondern auch des Gespürs für den zu verwendenden Werkstoff mit allen seinen Möglichkeiten, Besonderheiten und Grenzen.

Für uns Ingenieure, die mit der Schaffung wettbewerbsfähiger, industrieller Produkte befaßt sind, tritt die Ökonomie als wesentlicher Faktor hinzu. Ihr muß durch die Beherrschung von *Konstruktion, Werkstoff- und Fertigungstechnik* Rechnung getragen werden, eine Herausforderung, die um so kritischer ist, wenn es sich wie im Falle des Aluminiums um einen Werkstoff mit einer teuren Metallbasis handelt, der darüber hinaus bisher in der heutigen Ingenieurausbildung nicht angemessen berücksichtigt wird. Wettbewerbsfähiger wirtschaftlicher Leichtbau mit dem Werkstoff Aluminium erfordert die gleichzeitige Beherrschung und Berücksichtigung der aluminiumspezifischen Grundlagen in Konstruktion und Fertigung sowie den Einsatz der besten verfügbaren Technologien.

In der Vergangenheit war die werkstofftechnische Ingenieuraufgabe meistens beschränkt auf eine „Insellösung“, d.h. in der arbeitsteiligen Wirtschaft wurde jeweils für eine bestimmte Teilaufgabe oder -funktion eine Lösung gesucht. Das Ziel einer solchen Arbeitsweise war erreicht, wenn die Lösung zu wettbewerbsfähigen Kosten produziert werden konnte. Dabei wurden – und werden vielfach auch heute noch – die Erfahrungen mit anderen Werkstoffen zugrunde gelegt. Ein Beispiel ist die Aluminium-Karosserieteilfertigung, wo die gleichen konstruktiven Forderungen gestellt und die gleichen maschinentechnischen Einrichtungen und Fertigungsabläufe verwendet werden wie bei der Stahlkarosseriefertigung. Die bekannten Mängel in der Umformbarkeit und Punktschweißbarkeit des herkömmlichen Aluminiumblechs wurden durch spezielle Legierungen, durch Änderungen in der Tribologie der Walzoberfläche, durch Anpassung der Geometrie und durch weitere Maßnahmen im Handling und in den Fertigungszwischenstufen verbessert. Im Ergebnis muß man feststellen, daß zwar die gleichartige Herstellung von Aluminium- und Stahlkarosserieteilen durchaus möglich ist, daß aber zu den häufig höheren Metallkosten noch weitere Kostenfaktoren aus den fertigungstechnischen Zusatzmaßnahmen hinzukommen, die diese Werkstoffsubstitution bei einem Großserienprodukt sehr kostspielig machen. Kann das eine dauerhafte, zukunftsweisende Lösung – ein „sustainable development“ – sein?

Daß die Gesamtkosten eines verkaufbaren Produktes die Summe aller Einzelkosten sind, ist eine Binsenweisheit. Daß aber die Minimierung der Gesamtkosten nicht gleichbedeutend sein muß mit der Minimierung aller Einzelkosten, ist nicht immer einsichtig. So können höhere Kosten im Einzelfall dennoch zu einem wirtschaftlicheren Gesamtergebnis führen, wenn sich durch Synergieeffekte in anderen Bereichen Kosteneinsparungen ergeben. Da das Rohmetall Aluminium, d.h. das unverarbeitete Material, üblicherweise teurer ist als andere Rohmaterialien, ist das systematische Nachdenken über Synergieeffekte eine