

Friedrich Ostermann

Anwendungstechnologie Aluminium

2., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage



Springer

trimet

VDI

Friedrich Ostermann

Anwendungstechnologie Aluminium

Friedrich Ostermann

Anwendungstechnologie Aluminium

2., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage

Mit 577 Abbildungen und 111 Tabellen

 Springer

Professor Dr.-Ing. Friedrich Ostermann
Aluminium Technologie-Service, Meckenheim
ostermann@aluminiumtechnologie.de

Autor und Verlag danken der TRIMET ALUMINIUM AG, Essen, für die Unterstützung der Drucklegung dieses Buches.

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.

ISBN 978-3-540-71196-4 2. Auflage Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN 3-540-62706-5 1. Auflage Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der 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 ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998, 2007

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 dürften. 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.

Satz: Marianne Schillinger-Dietrich, Berlin
Herstellung: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Einbandgestaltung: WMXDesign, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3180/YL – 5 4 3 2 1 0

Vorwort zur 2. Auflage

Seit dem Erscheinen der 1. Auflage von ANWENDUNGSTECHNOLOGIE ALUMINIUM im Jahre 1998 haben sich zahlreiche Entwicklungen in der Aluminiumkunde und Anwendungsforschung, im Einsatz des Werkstoffs und im wirtschaftlichen Umfeld der Hersteller und Verarbeiter vollzogen, denen bei der Neuauflage des Buches Rechnung getragen werden soll. Gleichzeitig bietet der kritische Rückblick auf die damalige Themenauswahl die Möglichkeit, die Schwerpunkte an den sichtbar gewordenen Entwicklungstrends neu auszurichten.

Einerseits haben sich durch die Forderungen aus der Anwendungspraxis, aber auch durch die Weiterentwicklung von wissenschaftlichen Methoden und theoretischen Erkenntnissen in jüngster Zeit neue Einsichten und Perspektiven bei den Aushärtungsprozessen ergeben, die als wohl die wichtigste metallurgische Grundlage für Aluminiumkonstruktionswerkstoffe anzusehen sind, und deren Entdeckung vor genau 100 Jahren von *Alfred Wilm* patentiert wurde. In der Anwendungsforschung werden Konzepte für die Vorhersage des Verhaltens unter Crash-Bedingungen und Schwingbeanspruchung entwickelt, die zunehmend die metallphysikalischen Basisprozesse des plastischen Fließens und Bruchs einschließen. Daher wurde den metallkundlichen Prozessen ein breiterer Raum eingeräumt in der Absicht, durch verständliche Beschreibung die z.T. sehr komplexen Vorgänge im Werkstoff für den mit Anwendungsentwicklungen befaßten Werkstoffingenieur zugänglich zu machen. Im Vordergrund steht eine möglichst umfassende Dokumentation der beobachteten Phänomene des Werkstoffverhaltens und weniger dessen rechnerische Simulation, die anderen Werken* vorbehalten sein mögen. Berechnungskonzepte sind nur dann wirklich zuverlässig, wenn sie mit den metallphysikalischen Vorgängen in Einklang stehen.

Andererseits ist in den vergangenen Jahren die Akzeptanz des Aluminiums als Leichtbauwerkstoff für den Fahrzeugbau so weit gestiegen, daß jeder Automobilhersteller heute Teile, Baugruppen oder vollständige Ka-

*) z.B. Hirsch, J. (Hrg.): Virtual Fabrication of Aluminium Products. Microstructural Modeling in Industrial Aluminium Production. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2006

rosserien aus diesem Werkstoff baut, ohne dessen generelle Tauglichkeit mehr in Frage zu stellen. Die gewonnenen Erfahrungen und das Interesse der Automobilindustrie sind deshalb auch die treibende Kraft für zahlreiche Entwicklungen und Innovationen in den Verarbeitungstechnologien, eine Rolle, die früher vor allem von der Luft- und Raumfahrtindustrie wahrgenommen wurde. Hinter all diesen Entwicklungen steht die Frage nach der Wirtschaftlichkeit solcher Anwendungen in einem wettbewerbsorientierten Markt, d.h. die Senkung der Verarbeitungskosten durch intelligente Vermeidung unnötiger Verarbeitungsschritte. Auch dieser Lösungsweg verlangt nach detaillierten Kenntnissen des Werkstoffverhaltens, das in der Beschreibung technologischer Verarbeitungsprozesse gegenüber der 1. Auflage des Buches stärker betont wird.

Sorge bereitet die Kontinuität innovationsträchtiger Forschungs- und Entwicklungsarbeit. In jüngster Zeit hat sich ein struktureller Wandel in der deutschen Aluminiumindustrie eingestellt mit problematischen Folgen für Forschung und Innovation und damit letztlich für die Zukunft der Aluminiumindustrie in Deutschland. Mengenmäßig ist der deutsche Aluminiummarkt der größte in Europa und erreicht technologisch die größte Verarbeitungstiefe. Um so besorgniserregender ist der Umstand, daß die Industrie- und Wirtschaftspolitik der vergangenen Jahre bis in die Gegenwart zu einem Ausverkauf der Aluminiumhüttenindustrie geführt hat, die Initiator und wichtigster Förderer der Aluminiumforschung und Anwendungsentwicklung in diesem Lande war. Die Wertschöpfung in der Primärerzeugung war immer die wichtigste finanzielle Grundlage für die Aluminiumforschung. Mit der Übernahme der nationalen Aluminiumkonzerne durch ausländische Konzerne wandert die industriedominierte Aluminiumforschung als Quelle von Innovationen ab oder wird durch ausländische Forschungszentralen fremdgesteuert. Die notwendige Nähe des Forschers zum Anwender schwindet. Die für diesen Industriestandort fatale Energiepolitik in Vergangenheit und Gegenwart hat das Schließen zahlreicher Aluminiumhütten zu verantworten. Um so beachtenswerter ist die jüngste Initiative eines Privatunternehmers, eine bereits geschlossene Aluminiumhütte zu übernehmen und weiter zu betreiben.

Die Rolle der Primärhütten kann durch die Sekundärhüttenindustrie nicht aufgefangen werden, die Wertschöpfung ist geringer und die Versorgungsbasis zu volatil. Ob ohne direkte und kontinuierliche Industriebeteiligung die Aluminiumforschung an den Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen aufgefangen werden kann, ist zweifelhaft, da die Kontinuität von Wissen und Erfahrung dort nicht gewährleistet werden kann. Ein Ausweg wäre ein ausschließlich der Aluminiumforschung und -lehre gewidmeter Lehrstuhl. Zu denken gibt weiterhin, daß schon heute die aktive Beteiligung von Aluminiumfachleuten an der Steuerung der nationalen Industriellen Gemeinschaftsforschung und der internationalen

nen Industriellen Gemeinschaftsforschung und der internationalen Normungsarbeit alles andere als lebhaft ist, und dadurch weder die eigenen Erfahrungen eingebracht noch die eigenen Interessen vertreten werden können. Es ist zu hoffen, daß die mittelständische Aluminiumindustrie diese Rolle als gemeinschaftliche Aufgabe zur Zukunftssicherung übernimmt.

Ich hoffe, daß das Buch dazu beiträgt, über den fachlichen Diskurs hinaus die Faszination der Beschäftigung mit diesem Werkstoff auf Lehrende, Lernende und im Beruf stehende Ingenieure auszustrahlen. Das Potential des Werkstoffs ist keineswegs ausgeschöpft, und phantasievolle Kreativität, Nutzung und Fortentwicklung der Aluminium-Anwendungstechnologien werden den Erfolg bei heutigen und künftigen Produkten gewährleisten.

Mein herzlicher Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen, die durch Informationen, Diskussionen und Bildmaterial zu diesem Buch beigetragen haben, Herrn Gerd Bulian für das fachkritische Lesen des Manuskriptes sowie meiner Frau für ihre Geduld, Ermutigung und liebevolle Unterstützung.

Meckenheim, im Januar 2007

Friedrich Ostermann

Inhalt

Tabellenverzeichnis	XVII
1 Einführung	1
1.1 Der Wettbewerb der Werkstoffe in den Märkten	1
1.2 Innovationsgrundlagen	3
2 Märkte und Anwendungen	9
2.1 Aluminium im Automobilbau	10
2.1.1 Aluminium im Antriebsbereich	13
2.1.2 Aluminium im Fahrwerksbereich	22
2.1.3 Aluminium im Karosseriebau	27
2.2 Aluminium im Nutzfahrzeugbau	41
2.3 Aluminium im Schienenfahrzeugbau	46
2.3.1 Entwicklung aluminiumgerechter Baukonzepte	47
2.3.2 Aluminiumwerkstoffe für die Schienenfahrzeugbau	51
2.3.3 Schweißverbindungen im Schienenfahrzeugbau	53
2.4 Aluminium im Schiffbau.....	58
2.5 Aluminium im Flugzeugbau.....	61
2.6 Architektur und Ingenieurbau	67
2.7 Sonstige Anwendungsmärkte.....	72
2.7.1 Maschinen-, Apparate- und Werkzeugbau	72
2.7.2 Elektrotechnik	74
2.7.3 Verpackung	75
3 Legierungsaufbau, Wärmebehandlung, Normen	79
3.1 Gefügebausteine der Aluminiumwerkstoffe.....	80
3.1.1 Gefügematrix	80
3.1.2 Gitterfehler.....	83
3.1.3 Korngrenzen	91
3.1.4 Mischkristallbildung	94
3.1.5 Primärphasen (Gußphasen).....	100
3.1.6 Sekundärphasen	100
3.1.7 Warmverformungs-, Faser-, Erholungs- und Rekristallisationsgefüge	110
3.1.8 Poren.....	111
3.1.9 Oxideinschlüsse	112
3.2 Aufbau und Wärmebehandlung der Knetwerkstoffe	112

3.2.1	Unlegiertes Aluminium	113
3.2.2	AlMn-Legierungen	115
3.2.3	AlMg(Mn)-Legierungen	117
3.2.4	AlCu(Mg,Si)-Legierungen.....	131
3.2.5	AlMgSi-Legierungen.....	138
3.2.6	AlZnMg(Cu)-Legierungen.....	157
3.2.7	Sonstige Knetlegierungen.....	168
3.2.8	Durchführung von Wärmebehandlungen.....	170
3.3	Legierungsaufbau und Wärmebehandlung von Gußlegierungen	185
3.3.1	Schmelze und Schmelzereinigung	186
3.3.2	Erstarrungsvorgang (Kristallisation).....	189
3.3.3	Erstarrungsfehler	196
3.3.4	Fließ- und Formfüllungsvermögen	200
3.3.5	Aluminium-Gußlegierungen.....	201
3.3.6	Verarbeitungs- und Anwendungshinweise	207
3.3.7	Gießgerechte Gestaltung	209
3.4	Einführung in die Normen über Aluminiumlegierungen.....	209
3.4.1	Einführung in die Bezeichnungssysteme der Aluminiumwerkstoffe	210
3.4.2	Bezeichnungssystem für Knetlegierungen und deren Werkstoffzustände.....	212
3.4.3	Bezeichnungssystem für Formgußlegierungen, Gießverfahren und für die Werkstoffzustände von Formgußteilen	215
3.4.4	Halbzeugnormen.....	218
3.4.5	Garantierte und typische Eigenschaften	218
3.4.6	Legierungsauswahl – frei oder eingeschränkt?.....	220
4	Physikalische Eigenschaften	221
4.1	Physikalischen Eigenschaften des Aluminiums.....	221
4.1.1	Dichte.....	222
4.1.2	Elektrische Leitfähigkeit	223
4.1.3	Magnetische Eigenschaften.....	223
4.1.4	Wärmeleitfähigkeit	223
4.1.5	Reflexions- und Emissionseigenschaften.....	224
4.2	Physikalische Eigenschaften von Aluminiumoxid.....	225
5	Korrosionsverhalten von Aluminium	227
5.1	Allgemeine Grundlagen.....	227
5.1.1	Einflüsse auf das Korrosionsverhalten.....	228
5.1.2	Korrosionsverhalten von Aluminium in Freibewitterung und Meerwasser.....	229
5.2	Oxidschicht und Korrosionsmechanismus des Aluminiums	232
5.2.1	Aufbau und Bedeutung der Oxidschicht.....	232
5.2.2	Verstärkung der natürlichen Oxidschicht.....	234
5.2.3	Beständigkeit der Oxidschicht.....	234
5.2.4	Korrosionsmechanismus	236

5.2.4	Freie und kritische Korrosionspotentiale	238
5.2.5	Stromdichte-Potentialkurven	241
5.3	Einfluß der Legierungselemente	242
5.3.1	Bedeutung der Gefügestruktur	242
5.3.2	Korrosionsbeständigkeit	243
5.4	Erscheinungsformen der Korrosion bei Aluminium und seinen Legierungen	246
5.4.1	Lochkorrosion (LK)	246
5.4.2	Selektive Korrosion (SK)	248
5.4.3	Spannungsrißkorrosion (SpRK)	252
5.4.4	Interkristalline Korrosion unter Spannung	255
5.4.5	Spaltkorrosion	256
5.4.6	Kontaktkorrosion	258
5.4.7	Korrosionsermüdung	263
5.4.8	Reibkorrosion	271
5.4.9	Filiformkorrosion	272
5.5	Beispiele für korrosionsgerechtes Konstruieren	272
6	Mechanische Eigenschaften	279
6.1	Statische mechanische Kennwerte	280
6.2	Fließkurve, Verfestigung, Anisotropie, Verformbarkeit	286
6.3	Bruchvorgang und Bruchverhalten	298
6.4	Schwingfestigkeitsverhalten von Aluminiumwerkstoffen	318
6.4.1	Phänomenologie der Ermüdungsschädigung	321
6.4.2	Zyklisches Spannungs-Dehnungsverhalten	334
6.4.3	Rißfortschrittsverhalten	337
6.4.4	Dehnungs-Wöhlerkurve (ϵ/N -Kurve)	344
6.4.5	Spannungs-Wöhlerkurve (S/N -Kurve)	350
6.4.6	Langzeitfestigkeit („Dauerfestigkeit“) von Aluminium- werkstoffen	353
6.4.7	Mittelspannungsempfindlichkeit	355
6.4.8	Einfluß von Kerben auf die Schwingfestigkeit	359
6.4.9	Wirkung von Eigenspannungen auf die Schwing- festigkeit	364
6.5	Einfluß hoher Dehngeschwindigkeit	368
6.6	Verhalten bei unterschiedlichen Temperaturen	376
6.6.1	Elastizitätsmodul bei unterschiedlichen Temperaturen	377
6.6.2	Mechanische Eigenschaften bei tiefen Temperaturen	378
6.6.3	Mechanische Eigenschaften bei höheren Temperaturen	380
6.6.4	Umformbarkeitseigenschaften bei höheren Temperaturen	384
6.7	Einfluß des Spannungszustands	388
6.7.1	Fließbedingungen (Fließhypothesen)	388
6.7.2	Fließortkurven	391
6.7.3	Grenzformänderung bei ebenem Spannungszustand	394
6.7.4	Einfluß der Mehrachsigkeit auf die Duktilität	397

7 Gießverfahren	399
7.1 Stranggießverfahren	399
7.2 Formgießverfahren	402
7.3 Vergleich der Formgießverfahren	419
8 Walzen	423
8.1 Walzprozeß	423
8.2 Qualitätsmerkmale von Warm- und Kaltwalzblechen	425
8.3 Oberflächenbeschichtete Walzfabrikate	430
8.4 Verbundhalbzeuge	432
9 Strangpressen	435
9.1 Strangpreßverfahren	436
9.2 Grundformen von Profilen und Werkzeugen	439
9.3 Strangpreßbarkeit von Aluminiumlegierungen	440
9.4 Prozeßkette im Strangpreßwerk	444
9.5 Strangpreßgerechte Profil- und Werkzeuggestaltung	446
9.6 Gestalten von Strangpreßprofilen	450
9.6.1 Funktionalitätsgruppen	450
9.6.2 Konstruktionen mittels Profilverbindungen	452
9.7 Sonderverfahren des Strangpressens von Aluminium	455
9.7.1 Strangpressen nach dem „Conform“-Verfahren	455
9.7.2 Hydrostatisches Strangpressen	455
9.7.3 Verbundstrangpressen	456
9.7.4 Warmbiegen von Profilen beim Preßvorgang	456
10 Schmieden von Aluminium	459
10.1 Prozeß des Gesenkschmiedens	460
10.2 Schmiedegesenke	462
10.3 Stofffluß und Faserverlauf	464
10.4 Schmiedelegierungen, Vormaterial, Gefüge und Arbeitsablauf	467
10.5 Gestalten von Schmiedeteilen	473
11 Kaltfließpressen von Aluminium	475
11.1 Charakteristische Merkmale von Kaltfließpreßteilen	475
11.2 Aluminium für technische Fließpreßteile	477
11.2.1 Vormaterial: Butzen	477
11.2.2 Aluminiumlegierungen für das Kaltfließpressen	479
11.2.3 Alternative Ausgangszustände für das Kaltfließpressen	481
11.3 Fließpreßverfahren	484
11.3.1 Grundverfahren des Fließpressens	484
11.3.2 Werkzeuge für das Kaltfließpressen	487
11.3.3 Kraftbedarf beim Kaltfließpressen	487
12 Aluminiumblechumformung	491
12.1 Werkstoffeigenschaften für die Blechumformung	492

12.1.1 Werkstoffeigenschaften aus Zugversuchen	492
12.1.2 Werkstoffeigenschaften aus technologischen Prüfungen	493
12.1.3 Biegefähigkeit	502
12.1.4 Rückfederung	509
12.1.5 Aluminiumlegierungen für Karosserieanwendungen	511
12.2 Tribologisches Verhalten	516
12.2.1 Reibungsmechanismus	516
12.2.2 Das Tribosystem Blech-Werkzeug-Schmierstoff	518
12.3 Scherschneiden	525
12.3.1 Trennvorgang beim Normalschneiden	526
12.3.2 Genauschneiden	531
12.3.3 Feinschneiden	533
13 Sondergebiete der Umformtechnik	535
13.1 Weiterverarbeitung von Profilen und Rohren	535
13.1.1 Biegen und Biegeverfahren	536
13.1.2 Örtliche Querschnittsänderungen	542
13.1.3 Innenhochdruckumformen	545
13.2 Halbwarmumformen	547
13.3 Superplastische Umformung	549
13.3.1 Mechanismen und Werkstoffe	549
13.3.2 Verfahren der superplastischen Blechumformung	552
14 Spanende Formgebung von Aluminium	555
14.1 Spanbildung	556
14.2 Spanformen bei Aluminiumwerkstoffen	559
14.3 Aluminiumwerkstoffe für Zerspanungszwecke	561
14.4 Zerspanbarkeit	564
14.5 Werkzeugverschleiß	565
14.6 Schneidwerkstoffe für die Aluminiumzerspanung	568
14.7 Kühlschmierstoffe	570
14.8 Oberflächen spanend bearbeiteter Al-Werkstoffe	572
14.9 Funkenerosive Bearbeitung	573
15 Oberflächenbehandlung	577
15.1 Reinigungsprozeß	579
15.2 Vorbehandlung	582
15.3 Beschichtungen	583
15.3.1 Anodische Oxidation	583
15.3.2 Metallische Beschichtungen aus wäßrigen Lösungen	586
15.3.3 Verschleißfeste Oberflächen durch thermisches Spritzen	588
15.3.4 Beschichten mit organischen Stoffen (Lackieren)	588
16 Schmelzschweißen von Aluminium	591
16.1 Schweißbeignung der Aluminiumwerkstoffe	592
16.2 Eigenschaften von Aluminiumschweißverbindungen	602

16.3 Schmelzschweißverfahren für Aluminium	607
16.3.2 Strahlschweißverfahren	616
16.4 Schweißimperfektionen	621
17 Widerstandsschweißen	625
17.1 Widerstandspunktschweißen (WPS)	625
17.1.1 Verfahrensprinzip	625
17.1.2 Übergangswiderstände der Fügeoberfläche	627
17.1.3 Elektrodenverschleiß und Elektrodenreinigung	629
17.1.4 Schweißneigung von Legierungen	630
17.1.5 Maschinen und Elektroden	630
17.1.6 Festigkeitsverhalten von Aluminium-WPS-Verbindungen	634
17.2 Buckelschweißen	636
18 Mechanisches Fügen	639
18.1 Merkmale mechanischer Fügeverfahren	639
18.2 Durchsetzfügen	642
18.3 Nieten	646
18.3.1 Vollniete	647
18.3.2 Blindniete	647
18.3.3 Schließringbolzen	648
18.3.4 Stanzniet	649
18.4 Schraubverbindungen	652
18.5 Festigkeitseigenschaften mechanisch gefügter Verbindungen	655
19 Sonderverfahren der Fügeverfahren	659
19.1 Rührreibschweißen (Friction Stir Welding / FSW)	659
19.2 Reibschweißen	664
19.3 Explosivschweißen	668
19.4 Hartlöten	669
20 Einführung in das Konstruieren mit Aluminium	677
20.1 Gestaltungsgrundsätze	677
20.2 Elastizitätsmodul und Leichtbau	680
20.3 Schweißkonstruktionen	686
20.3.1 Grundsätze zur Gestaltung von Schweißverbindungen	686
20.3.2 Eigenspannungen in Schweißverbindungen	691
20.3.3 Schwingfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen	699
20.3.4 Nachbehandlung zur Schwingfestigkeitsverbesserung	713
21 Sonderwerkstoffe	717
21.1 Aluminiumpulvermetallurgie	717
21.1.1 Herstellen von Legierungspulvern	717
21.1.2 Kompaktieren von Pulvern zu Formteilen	720
21.1.3 Sprühkompaktieren	722
21.1.4 PM-Legierungen	724

21.2 Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe	725
22.2.1 Grundlagen und Eigenschaften.....	725
21.2.2 Anwendungsbeispiele	729
21.3 Aluminiumschaumwerkstoffe	731
21.3.1 Metallschaumherstellung	732
21.3.2 Eigenschaftsspektrum metallischer Schäume	733
21.3.3 Anwendungsaspekte	734
22 Gewinnung, Recycling, Ökologie	737
22.1 Primäraluminium	737
22.1.1 Vorkommen, Bauxiterze	737
22.1.2 Gewinnungsprozeß	739
22.2 Sekundäraluminium	742
22.2.1 Ressourcen und Verwendung	743
22.2.2 Materialkreislauf („Recycling“).....	743
22.3 Versorgungslage in Deutschland	745
22.4 Ökologische Betrachtungen	746
22.4.1 Ökobilanzen (Life Cycle Assessment)	746
22.4.2 Energiefragen der Aluminiumgewinnung.....	749
Anhang	753
Literatur.....	803
Sachverzeichnis.....	871

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1 Einige vorteilhafte Gebrauchseigenschaften von Aluminium.....	2
Tabelle 2.1 Endverbrauch von Aluminiumhalbzeugen, Formguß, Folie und Pulver im Jahr 2004	9
Tabelle 2.1.1 Eigenschaften von Aluminium-Kolbenlegierungen.....	15
Tabelle 2.1.2 Aluminiumlegierungen für Zylinderköpfe	16
Tabelle 2.1.3 Aluminiumlegierungen für Motorblöcke.....	18
Tabelle 2.1.4 Legierungen von Halbzeugen und Hartloten für Wärmetauscher	21
Tabelle 2.1.5 Karosserieblechlegierungen für Motorhauben.....	28
Tabelle 2.1.6 Strangpreßlegierungen für Stoßfänger	30
Tabelle 2.1.7 Merkmale der Audi Modelle A8 und A2.....	34
Tabelle 2.1.8 Aluminiumlegierungen für Beplankungs- und Strukturteile	37
Tabelle 2.1.9 Karosserieblechlegierungen ausländischer Provenienz.....	38
Tabelle 2.1.10 Fertigungsschema von Blechkarosserieteilen aus Stahl und Aluminium	41
Tabelle 2.2.1 Aluminiumlegierungen für Bordwandprofilsysteme.....	43
Tabelle 2.2.2 Äquivalente Mindestwanddicken	45
Tabelle 2.2.3 Mindestwanddicke für Tankkörper nach DIN EN 13094	45
Tabelle 2.2.4 Für den Tankbehälterbau geeignete Aluminiumlegierungen....	46
Tabelle 2.3.1 Aluminiumlegierungen für den Schienenfahrzeugbau.....	52
Tabelle 2.3.2 Mindesteigenschaften von Schweißverbindungen für den Schienenfahrzeugbau	54
Tabelle 2.4.1 Aluminium-Knetlegierungen für Anwendungen in tragenden Konstruktionen (n. Germanischer Lloyd, 2005).....	60
Tabelle 2.4.2 Gußlegierungen, die dem Seewasserklima ausgesetzt werden können (n. Germanischer Lloyd, 2005)	61
Tabelle 2.5.1 Ausgewählte Luftfahrtlegierungen	63