

HANSER



Leseprobe

zu

Werkstofftechnik 2

von Wolfgang Bergmann und Christoph Leyens

Print-ISBN: 978-3-446-46746-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-46818-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446467460>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Die praktische Werkstoffanwendung besteht in der funktionsgemäßen und formgebenden Gestaltung (Konstruktion, Fertigung) von Materie (Werkstoffe) zu Produkten. Ein wesentliches Ziel des vorliegenden Teils 2 „Anwendung“ liegt darin, dem Studenten des Ingenieurwesens diese enge Verknüpfung von Konstruktions-, Werkstoff- und Fertigungstechnik bewusst zu machen.

Werkstofftechnik bedeutet auch die technische Umsetzung von Werkstoffwissenschaft, deren Grundlagen – auf welcher Verständnisebene auch immer – die Basis für das Fachgebiet „Werkstofftechnik“ darstellen. Keines der in diesem Buch zahlreich gewählten Verfahrens- und Anwendungsbeispiele ist für sich genommen von grundsätzlicher Bedeutung, in ihrer Gesamtheit sollen sie jedoch nachdrücklich vor Augen führen, dass jede effektive Art moderner Werkstoffanwendung die Kenntnis und Beachtung der chemisch-physikalischen Grundlagen, die jegliches Werkstoffverhalten bestimmen, voraussetzt. Insofern ist der 2. Teil „Anwendung“ nur als beispielgebende Ergänzung zum 1. Teil „Grundlagen“ zu betrachten. Ohne Beachtung der werkstoffwissenschaftlichen Grundlagen bliebe das Fach „Werkstofftechnik“, was es früher, in den Anfängen auch vielfach war, eine wenig logische und dem Prozess rascher Alterung unterliegende Ansammlung von Faktenwissen.

Ungeachtet dieser Einschränkungen benötigt der angehende Ingenieur neben den unverzichtbaren Grundlagen auch ein gehöriges Maß an Praxisbezug. Erstaunlich selten kommt es beim Gebrauch von technischen Systemen zu konstruktiv, fertigungs- oder werkstofftechnisch bedingten Störungen oder gar katastrophalen Schadensfällen. Die Ursachen für solche Schadensfälle liegen fast immer in menschlichem Fehlverhalten bis hin zu unverantwortlicher Nachlässigkeit. Dies könnte allerdings zu der absolut irri- gen Annahme führen, dass moderne Produkte mit modernen Entwurfsmethoden entwickelt, mit modernen Fertigungsverfahren hergestellt und mit modernen Prüfverfahren qualifiziert grundsätzlich perfekt seien und daher auf detailliertere Werkstoffkenntnisse auch verzichtet werden könne. Das Gegenteil ist der Fall. Werkstoffe in neueren Konstruktionen werden – abgesehen von einem notwendigen Sicherheitsabschlag – zunehmend in ihrem oberen Grenzbereich beansprucht. Nur eine Werkstoffentwicklung, die sich die Fortschritte der Werkstoffwissenschaft zunutze macht, sowie eine Werkstofftechnik, die hieraus strikt und akribisch einzuhaltende Regeln für die Anwendung erarbeitet, machen die in letzter Zeit erzielten Leistungssteigerungen bei gleichzeitig hohem Zuverlässigkeitsniveau möglich. Die notwendige Sicherheitsmarge muss in beleg- und verantwortbarer Weise kalkuliert sein, dazu bedarf es eines intensiven, sachbezogenen Dialoges zwischen Konstrukteur, Fertigungs- und Werkstoffspezialist. Diesen Dialog mit seinen am technischen Entscheidungsprozess mitbeteiligten Partnern führen zu können und eine gewisse Vertrautheit mit den Prinzipien und Denkweisen des jeweils anderen Fachgebietes gehören zu den Grundqualifikationen eines Ingenieurs. Die im Kapitel G aufgeführten Anwendungsbeispiele sollen helfen,

beim angehenden Ingenieur diese Dialogfähigkeit und das Verantwortungsbewusstsein für die von ihm geschaffenen Produkte zu entwickeln.

Beide Bücher bieten weitaus mehr, als es ein knappes, repetitorienhaftes Skriptum leisten kann; sie informieren den interessierten Leser kurz und unter Fortfall weitreichender Details auch über die wesentlichen Problemstellungen der verschiedenen werkstofftechnischen Sondergebiete, ohne dass er zur für eine solche Orientierung immer viel zu umfangreichen und nur selten verfügbaren Spezialliteratur greifen muss.

Studenten beklagen oftmals den Umfang beider Bücher, den sie bei ihrer Prüfungsvorbereitung im Grundstudium kaum zu bewältigen vermögen. Dem ist zu entgegnen, dass es sich bei Lehrbüchern dieser Art nicht um Lesebücher handelt, die man Seite für Seite bis zum Ende durchliest. Es kommt vielmehr darauf an, sich zuvor einen detaillierten Plan darüber zu erstellen, welche Begriffe und Zusammenhänge man nach erfolgreich vollzogener Vorbereitung eigentlich verstanden bzw. „begriffen“ haben sollte. Die Frage, „was will ich eigentlich lernen?“, sollte immer am Anfang stehen. Erst dann beginnt die gezielte und anfangs sogar sehr selektive Arbeit mit und in dem Buch. Ein breit angelegtes Sachwortverzeichnis kann dabei nur willkommen sein.

Neuerungen auf dem Gebiet der Werkstofftechnik ersetzen nur sehr selten bereits vorhandene Werkstoffe, im Allgemeinen erweitern sie das ohnehin schon breite Spektrum dieses Fachgebietes. Um aber auch hier Neuentwicklungen ohne Ausweitung des Buchumfanges berücksichtigen zu können, war ein Kleindruck von Textpassagen mit mehr ins Detail gehenden, eher ergänzenden Ausführungen unumgänglich. In der aktuellen weltweiten Forschung stellt die umfassende Erarbeitung der physikalisch-chemischen Grundlagen der so genannten Nanotechnologie und deren Nutzbarmachung für vielfältige Anwendungen auch in der Werkstofftechnik ein ganz zentrales Thema dar. Diese Arbeiten befinden sich aber überwiegend in einem noch so frühen und spekulativen Anfangsstadium, dass auf einen eigenständigen Abschnitt „Nanotechnologie“ in dieser Auflage verzichtet wurde.

Die fortschreitende Spezialisierung des Wissens, namentlich im naturwissenschaftlich-technischen Bereich hat zur Folge, dass das Angebot an zusammenfassenden Standardwerken im Gegensatz zu dem an Büchern mit spezieller Fachthematik deutlich abnimmt. Da aber auch Spezialliteratur auf einen ausreichend großen Leserkreis angewiesen ist, dominieren eindeutig Publikationen in englischer Sprache. Das hier zusammengestellte erweiterte Quellen- und Literaturverzeichnis spiegelt diese Entwicklung wider. Es zeigt sich auch hier, wie existenziell wichtig möglichst gute Englischkenntnisse für einen angehenden Wissenschaftler oder Ingenieur in einer weitgehend globalisierten Wissenschaft und Technik sind.

Die fünfte Auflage wurde um Inhalte zu den Themen Additive Fertigung, Photovoltaik-Materialien und Halbleiteranwendungen ergänzt und aktualisiert.

Inhaltsverzeichnis

E	Werkstoffherstellung	
1	Herstellung von Metallen	17
1.1	Metallurgische Verfahren	17
1.1.1	Erzaufbereitung	18
1.1.2	Herstellung des Rohmetalls	19
1.1.2.1	Pyrometallurgie	19
1.1.2.2	Hydrometallurgie	22
1.1.2.3	Schmelzflusselektrolyse	23
1.1.3	Herstellung des Gebrauchsmetalls	23
1.1.3.1	Raffination des Rohmetalls	23
1.1.3.2	Legieren	24
1.1.4	Gießen und Verformen	25
1.2	Eisen und Stahl	26
1.2.1	Herstellung von Eisen	27
1.2.1.1	Hochofenverfahren	27
1.2.1.2	Direktreduktions- und Schmelzreduktions-Verfahren	29
1.2.2	Herstellung von Stahl	30
1.2.2.1	Unerwünschte Begleitelemente	31
1.2.2.2	Konverterverfahren	37
1.2.2.3	Elektrostahlverfahren	39
1.2.2.4	Nachbehandlungsverfahren	41
1.3	Aluminium	46
1.4	Kupfer	47
1.5	Nickel	50
1.6	Titan	53
1.7	Magnesium	54
2	Herstellung von Kunststoffen	55
2.1	Technische Durchführung von Polyreaktionen	55
2.2	Chemischer Ablauf von Polyreaktionen	57
2.2.1	Polymerisation	57
2.2.2	Polykondensation	60
2.2.3	Polyaddition	61
2.3	Aufbereitung des polymeren Rohstoffs zum polymeren Werkstoff	63
3	Herstellung nichtmetallisch-anorganischer Werkstoffe	64
3.1	Keramik	64
3.1.1	Standardverfahren	64
3.1.1.1	Silicatkeramik	64

3.1.1.2	Oxidkeramik	66
3.1.1.3	Nichtoxidkeramik	66
3.1.2	Spezielle Herstellverfahren	66
3.1.3	Kohlenstoffprodukte	67
3.1.3.1	Diamant	67
3.1.3.2	Kohlenstoff- und Graphit-Werkstoffe	69
3.2	Glas	72
3.2.1	Rohstoffe und Gemengeansatz	72
3.2.2	Schmelzen	73
3.2.3	Homogenisieren und Läutern	74
3.2.4	Herstellungsbedingte Glasfehler	75
F	Werkstoffverarbeitung	
1	Verarbeitung metallischer Werkstoffe	76
1.1	Gießen	78
1.1.1	Gießverfahren	78
1.1.1.1	Sandguss	79
1.1.1.2	Formmaskenguss	82
1.1.1.3	Ausschmelzverfahren	82
1.1.1.4	Kokillenguss	83
1.1.1.5	Druckguss	84
1.1.1.6	Schleuderguss	85
1.1.2	Vorgänge bei der Erstarrung reiner Metalle	85
1.1.2.1	Lunkerbildung	85
1.1.2.2	Porenbildung	88
1.1.3	Vorgänge bei der Erstarrung von Legierungen	89
1.1.3.1	Seigerung	89
1.1.3.2	Konstitutionelle Unterkühlung	92
1.1.3.3	Warmrisse	94
1.1.4	Erstarrungsmorphologie	95
1.1.5	Gießbarkeit	96
1.1.6	Möglichkeiten zur Beeinflussung des Erstarrungsgefüges	97
1.1.7	Vergleich Gussgefüge – Verformungsgefüge	99
1.2	Galvanoformen	100
1.3	Pulvermetallurgie	101
1.3.1	Technische Durchführung pulvermetallurgischer Prozesse	102
1.3.1.1	Pulverherstellung und -aufbereitung	102
1.3.1.2	Herstellung neuer Werkstoffe in Pulverform	104
1.3.1.3	Formgebung	106
1.3.1.4	Sintern	109
1.3.1.5	Nachbehandlungen	110
1.3.2	Mechanische Eigenschaften gesinterter Bauteile	110

1.4	Umformen	111
1.4.1	Eigenschafts- und Gefügeänderungen	111
1.4.2	Verfahrensparameter	112
1.4.3	Reibung und Schmierung	113
1.4.4	Umformverfahren	114
1.4.4.1	Walzen	114
1.4.4.2	Schmieden	116
1.4.4.3	Strangpressen	117
1.4.4.4	Fließpressen	118
1.4.4.5	Tiefziehen	119
1.4.5	Umformbarkeit	120
1.4.5.1	Kenngrößen	120
1.4.5.2	Umformverhalten metallischer Werkstoffe	122
1.5	Zerspanen	125
1.5.1	Verfahren	125
1.5.2	Versagen des Schneidwerkzeuges	127
1.5.2.1	Versagen durch Überbeanspruchung	127
1.5.2.2	Versagen durch Verschleiß	127
1.5.3	Zerspanbarkeit	129
1.5.3.1	Beurteilungskriterien und Einflussgrößen	129
1.5.3.2	Zerspanungsverhalten einphasiger Metalle	130
1.5.3.3	Zerspanungsverhalten zwei- bzw. mehrphasiger Metalle	131
1.5.3.4	Automatenlegierungen	131
1.5.3.5	Trocken-, Hart- und Hochgeschwindigkeitszerspanung	133
1.6	Erodieren	135
1.7	Thermisches Trennen	136
1.8	Schweißen	138
1.8.1	Grundvorgang des Fügens	138
1.8.2	Schmelzschweißen	141
1.8.2.1	Lichtbogenhandschweißen	141
1.8.2.2	Unterpulver- und Elektroschlackeschweißen	144
1.8.2.3	Schutzgasschweißen	147
1.8.2.4	Schmelzschweißen mit Strahlen hoher Energiedichte	151
1.8.2.5	Sonstige Schmelzschweißverfahren	157
1.8.3	Pressschweißen	159
1.8.3.1	Widerstandspressschweißen	159
1.8.3.2	Diffusionsschweißen	160
1.8.3.3	Reib-, Reibrühr- und Ultraschallschweißen	161
1.8.3.4	Kaltpressschweißen	163
1.8.4	Schweißbarkeit technisch wichtiger Werkstoffe	163
1.8.4.1	Gefügeausbildung im Schweißnahtbereich	163
1.8.4.2	Gefügeausbildung in der Wärmeeinflusszone (WEZ)	164
1.8.4.3	Schweißfehler	166

1.8.4.4	Schweißspannungen	169
1.8.4.5	Probleme beim Schmelzschiessen von Eisenwerkstoffen	171
1.8.4.6	Probleme beim Schmelzschiessen von Nichteisenmetallen	179
1.8.4.7	Probleme beim Schmelzschiessen verschiedenartiger Metalle	183
1.8.4.8	Schweißbarkeit	183
1.9	Löten	184
1.9.1	Prinzipieller Vorgang und technische Durchführung	184
1.9.2	Weichlöten	186
1.9.3	Hartlöten	187
1.9.4	Lötbarkeit	188
1.10	Kleben	189
1.10.1	Klebvorgang sowie Vor- und Nachteile des Klebens	189
1.10.2	Ursachen der Adhäsion	190
1.10.3	Festigkeitsverhalten von Klebverbindungen	191
1.10.4	Klebstoffe für konstruktive Anwendungen	194
1.10.4.1	Phenolharz-Klebstoffe	195
1.10.4.2	Epoxidharz-Klebstoffe	195
1.10.4.3	Polyurethan-Klebstoffe	196
1.10.4.4	Acrylharz-Klebstoffe	196
1.10.4.5	Klebstoffe für erhöhte Temperaturen	197
1.10.5	Technische Durchführung von Klebungen	197
1.11	Beschichten	199
1.11.1	Reinigende Vorbehandlungen	200
1.11.2	Beschichten mit metallischen Überzügen	201
1.11.2.1	Schmelztauchen	201
1.11.2.2	Galvanisieren	202
1.11.2.3	Thermisches Spritzen	208
1.11.2.4	Plattieren	209
1.11.2.5	Diffusions- und Umschmelzlegieren	210
1.11.2.6	Abscheiden aus der Gas-(Dampf-)phase (PVD, CVD)	211
1.11.3	Beschichten mit organischen Überzügen	217
1.11.3.1	Anstriche	217
1.11.3.2	Pulverbeschichtungen	220
1.11.4	Beschichten mit anorganischen Überzügen	221
1.11.4.1	Konversionsschichten	221
1.11.4.2	Oxidschichten	222
1.11.4.3	Emaillieren	223
1.12	Wärmebehandlung	224
1.12.1	Technische Durchführung von Wärmebehandlungen	225
1.12.2	Allgemeine Verfahren zur Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe	229
1.12.2.1	Spannungsarmglühen	229
1.12.2.2	Homogenglühen	231

1.12.2.3	Weichglühen	231
1.12.2.4	Aushärten	232
1.12.2.5	Dispersionshärten	236
1.12.3	Spezielle Verfahren zur durchgreifenden Wärmebehandlung von Stahl	237
1.12.3.1	Normalglühen	237
1.12.3.2	Härten	239
1.12.3.3	Vergüten	249
1.12.3.4	Isothermes Umwandeln in der Bainitstufe	251
1.12.3.5	Weichglühen von Stahl	252
1.12.3.6	Glühen auf verbesserte Zerspanbarkeit	254
1.12.3.7	Thermomechanische Behandlungen	254
1.12.4	Verfahren zur Verfestigung der Randschicht von Stahlteilen	256
1.12.4.1	Wirkung einer Randschichtverfestigung auf das mechanische Verhalten von Bauteilen	257
1.12.4.2	Flamm- und Induktionshärten	259
1.12.4.3	Einsatzhärten	261
1.12.4.4	Nitrieren	268
1.12.4.5	Borieren	274
1.13	Spezielle Verfahren zur endformnahen Herstellung von Bauteilen	276
1.13.1	NNS-Urformverfahren	277
1.13.1.1	Spritzgießen	277
1.13.1.2	Thixoformen	277
1.13.1.3	Sprühkompaktieren	279
1.13.1.4	Additive Fertigung	280
1.13.2	NNS-Umformverfahren	282
1.13.2.1	Pulverschmieden	282
1.13.2.2	Innenhochdruck-Umformen	283
1.13.2.3	Superplastische Formgebung	284
2	Verarbeitung von Kunststoffen	286
2.1	Verarbeitungseigenschaften	286
2.1.1	Unvernetzte Polymere (Thermoplaste)	286
2.1.2	Vernetzte Polymere	289
2.2	Spanlose Formgebung thermoplastischer Kunststoffe	290
2.2.1	Urformen	290
2.2.1.1	Gießen	290
2.2.1.2	Extrudieren	291
2.2.1.3	Spritzgießen	293
2.2.1.4	Kalandrieren	297
2.2.1.5	Sintern	298
2.2.1.6	Schäumen	298

2.2.2	Umformen	300
2.2.2.1	Blasen	300
2.2.2.2	Warmformen	301
2.2.2.3	Verstrecken	302
2.3	Spanlose Formgebung vernetzender Kunststoffe	303
2.3.1	Duroplaste	303
2.3.1.1	Gießen	303
2.3.1.2	Pressen	304
2.3.1.3	Verarbeitung faserverstärkter Duroplaste	306
2.3.2	Elastomere	310
2.4	Zerspanen	311
2.5	Fügen	312
2.5.1	Schweißen	312
2.5.2	Kleben	314
2.6	Beschichten	315
2.7	Thermische Nachbehandlungen	316
3	Verarbeitung nichtmetallisch-anorganischer Werkstoffe	318
3.1	Keramik	318
3.1.1	Silicatkeramik	318
3.1.1.1	Formgebung	319
3.1.1.2	Trocknen	320
3.1.1.3	Brennen	321
3.1.1.4	Glasieren	322
3.1.2	Oxid- und Nichtoxidkeramik	323
3.1.2.1	Formgebung	323
3.1.2.2	Brennen	325
3.1.2.3	Metallisieren und Löten	326
3.2	Glas	327
3.2.1	Formgebung	327
3.2.2	Nachbehandlungen	331
4	Verarbeitungsbedingte Eigenschaftsänderungen	332
G	Werkstoffanwendung	
1	Korrosions-, Verzunderungs-, Verschleißschutz	335
1.1	Korrosionsschutz	335
1.1.1	Grundsätzliche Möglichkeiten	335
1.1.2	Aktiver Korrosionsschutz	336
1.1.2.1	Werkstoffwahl	336
1.1.2.2	Kathodischer Korrosionsschutz	336
1.1.2.3	Inhibitoren	338
1.1.2.4	Konstruktive Maßnahmen	339

1.1.3	Passiver Korrosionsschutz	341
1.1.3.1	Metallische Überzüge	341
1.1.3.2	Anstriche	344
1.2	Schutz gegen Hochtemperaturkorrosion	348
1.2.1	Verzundern	348
1.2.2	Heißgaskorrosion	351
1.2.3	Schutzmaßnahmen	352
1.2.4	Niedertemperatur-Korrosion (Taupunkt-)	354
1.3	Verschleißschutz	355
1.3.1	Verschleißsystem	355
1.3.2	Verschleißmechanismen	356
1.3.2.1	Adhäsionsverschleiß	356
1.3.2.2	Abrasionsverschleiß	357
1.3.2.3	Ermüdungverschleiß	358
1.3.2.4	Tribochemischer Verschleiß	358
1.3.3	Verschleißverhalten	359
1.3.3.1	Metalle	359
1.3.3.2	Nichtmetalle	360
1.3.4	Verschleißschutz	361
1.3.4.1	Wahl geeigneter Werkstoffe	361
1.3.4.2	Beschichtungen	362
1.3.4.3	Schmiermittel	363
2	Leichtbau	365
2.1	Gewichtsminderung und Betriebssicherheit	365
2.2	Betriebsfestigkeit	368
2.3	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	375
2.3.1	Fehler an der Werkstückoberfläche	375
2.3.1.1	Eindringverfahren	375
2.3.1.2	Magnetpulverprüfung	376
2.3.2	Fehler im Werkstückinnern	377
2.3.2.1	Durchstrahlungsprüfung mit Röntgen- und Gammastrahlen (Radiographie)	377
2.3.2.2	Ultraschallprüfung	379
2.3.2.3	Magnetinduktive Prüfverfahren	383
2.4	Leichtbauweisen	384
2.4.1	Stoffleichtbau	384
2.4.2	Formleichtbau	385
3	Leichtbauwerkstoffe	388
3.1	Verbundwerkstoffe	388
3.1.1	Prinzip der Faserverstärkung	389
3.1.2	Verbundwerkstoffe mit Polymermatrix (PMC)	391

3.1.3	Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix (MMC)	395
3.1.4	Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (CMC)	398
3.2	Leichtmetalle	400
3.2.1	Aluminium-, Titan-Legierungen	400
3.2.2	Magnesium-Legierungen	400
3.2.3	Beryllium-Werkstoffe	401
4	Werkstoffe im Maschinenbau	403
4.1	Bauteile	403
4.1.1	Allgemeine Baustähle	403
4.1.2	Vergütungsstähle	404
4.1.3	Einsatzstähle	406
4.1.4	Gusseisen	407
4.1.4.1	Grauguss mit Lamellengraphit (EN-GJL)	407
4.1.4.2	Grauguss mit Kugelgraphit (EN-GJS)	408
4.1.4.3	Temperguss (EN-GJM)	409
4.1.4.4	Hartguss (EN-GJN)	410
4.1.4.5	Sondergusseisen	411
4.1.5	Stahlguss	411
4.2	Federn	413
4.3	Verschraubungen	414
4.4	Lager	414
4.4.1	Wälzlager	414
4.4.2	Gleitlager	415
4.4.2.1	Anforderungen	415
4.4.2.2	Metallische Gleitlagerwerkstoffe	416
4.4.2.3	Nichtmetallische Gleitlagerwerkstoffe	419
4.5	Gehäuse	422
4.6	Dichtungen	422
5	Werkstoffe in der Fertigungstechnik	424
5.1	Werkzeugstähle	424
5.2	Schneidstoffe	427
5.2.1	Schnellarbeitsstähle	428
5.2.2	Hartmetalle	428
5.2.3	Oxidische Schneidkeramik	431
5.2.4	Nichtoxidische Schneidkeramik	432
5.2.5	Schleifmittel	434
6	Werkstoffe im Verkehrswesen	436
6.1	Werkstoffe in der Luft- und Raumfahrt	436
6.1.1	Flugzeugzelle	436
6.1.1.1	Al-Legierungen	436
6.1.1.2	Verbundwerkstoffe	441
6.1.1.3	Sonstige	443

6.1.2	Fahrwerk	446
6.1.3	Triebwerk	449
6.1.3.1	Funktionsweise	449
6.1.3.2	Hochtemperaturbeanspruchungen	451
6.1.3.3	Werkstoffe	452
6.1.4	Weltraumfahrzeuge	458
6.2	Werkstoffe im Automobilbau	463
6.2.1	Karosserie	463
6.2.2	Motor	465
6.2.3	Fahrwerk	470
6.3	Werkstoffe im Schienenfahrzeugbau	472
6.4	Werkstoffe im Stahl- und Schiffbau	476
6.4.1	Stahlbau	476
6.4.1.1	Normalfeste, schweißbare Baustähle	476
6.4.1.2	Hochfeste, schweißbare Feinkornbaustähle	476
6.4.2	Schiffbau	480
7	Werkstoffe in der Energie- und Verfahrenstechnik	483
7.1	Warmfeste Stähle	486
7.2	Kaltzähe Stähle	489
7.3	Korrosionsbeständige Werkstoffe	490
7.3.1	Eisen und Eisenlegierungen	490
7.3.1.1	Unlegierte, niedriglegierte Stähle und Gusseisen	490
7.3.1.2	Korrosionsbeständige Stähle	492
7.3.2	Aluminium und Aluminiumlegierungen	497
7.3.3	Kupfer und Kupferlegierungen	500
7.3.4	Nickel und Nickellegierungen	502
7.3.5	Titan und Titanlegierungen	503
7.3.6	Sondermetalle	503
7.3.7	Nichtmetalle	504
8	Werkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik	505
8.1	Werkstoffe mit Leitfunktion	505
8.1.1	Elektrische Leitung	505
8.1.1.1	Ionen-, Elektronenleitung	505
8.1.1.2	Bändermodell	506
8.1.1.3	Leiter, Halbleiter, Nichtleiter	507
8.1.1.4	Temperaturverhalten	508
8.1.1.5	Thermoelektrizität	510
8.1.2	Leiterwerkstoffe	511
8.1.3	Kontaktwerkstoffe	512
8.1.4	Widerstandswerkstoffe	515
8.1.5	Supraleiter	517

8.1.6	Halbleiter	522
8.1.6.1	Eigen-, Störstellen-, Verbindungshalbleiter	522
8.1.6.2	Halbleiter-Werkstoffe	525
8.1.6.3	Herstellen von Halbleitereinkristallen	527
8.1.6.4	Planartechnik	532
8.1.6.5	Anwendungen	539
8.2	Werkstoffe mit Isolierfunktion	552
8.2.1	Dielektrizität	552
8.2.1.1	Polarisationserscheinungen	552
8.2.1.2	Permittivitätszahl	553
8.2.1.3	Dielektrische Verluste	554
8.2.2	Elektrischer Widerstand	555
8.2.2.1	Durchgangswiderstand, Durchschlagfestigkeit	555
8.2.2.2	Oberflächenwiderstand, Kriechstromfestigkeit	557
8.2.3	Isolierstoffe	558
8.2.3.1	Anorganische Isolierstoffe	558
8.2.3.2	Organische Isolierstoffe	561
8.2.3.3	Gasförmige und flüssige Isolierstoffe	563
8.3	Werkstoffe mit magnetischer Funktion	564
8.3.1	Elektrische und magnetische Feldwirkung	564
8.3.2	Arten des Stoffmagnetismus	564
8.3.2.1	Dia-, Paramagnetismus	565
8.3.2.2	Ferro-, Antiferro-, Ferrimagnetismus	565
8.3.3	Magnetisierungsvorgänge	568
8.3.4	Magnetische Anisotropie	571
8.3.5	Weichmagnetische Werkstoffe	572
8.3.6	Hartmagnetische Werkstoffe	576
8.4	Werkstoffe mit dielektrischer Funktion	579
8.4.1	Kondensatorwerkstoffe	579
8.4.2	Ferroelektrika	581
8.4.3	Piezoelektrizität, Pyroelektrizität	583
H	Tabellenanhang	
1	Metallische Werkstoffe	585
2	Polymerwerkstoffe	599
3	Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe	603
4	Werkstoffe der Elektrotechnik	606
	Quellenverzeichnis und weiterführende Literatur	612
	Sachwortverzeichnis	632

E Werkstoffherstellung

1 Herstellung von Metallen

1.1 Metallurgische Verfahren

Abgesehen von *Edelmetallen*, die in der Erdkruste „gediegen“, d. h. in metallischer Form vorliegend, gefunden werden, kommen die **Metalle nur als Mineralien** in chemischer Verbindung, zumeist **oxidischer** oder **sulfidischer Art**, vor. **Erze sind in der Regel Mischungen mehrerer Mineralien**. Die Metallurgie hat die Herstellung von Metallen aus ihren Erzen zum Inhalt. Der metallurgische Herstellungsprozess vollzieht sich i. Allg. in drei Teilschritten (Abb. E.1-3):

- *Erzaufbereitung*, womit ein metallreicheres Konzentrat und/oder ein für die weiteren Verfahrensschritte besser präpariertes Erz erzeugt wird;
- *Gewinnung eines Rohmetalls*, was sowohl auf die Freisetzung des Metalls aus seiner chemischen Verbindung als auch auf eine Entfernung der Verbindungen anderer Metalle (Gangart) hinausläuft;
- *Raffination des Rohmetalls* bis zur gewünschten Reinheit, d. h. möglichst weitgehende Entfernung unerwünschter Begleitelemente.

Die Wahl des geeigneten Metallgewinnungs- und Raffinationsverfahrens hängt u. a. vom Erztyp, der Erzzusammensetzung, der Metallkonzentration ab, aber auch davon, ob bestimmte, wertvolle Begleitelemente ebenfalls gewonnen werden sollen, wie Edelmetalle bei der Kupfergewinnung oder Cobalt bei der Nickelgewinnung. So existiert eine Vielzahl von Verfahrenskombinationen und -varianten, die speziell auf das jeweils zu verarbeitende Erz zugeschnitten sind.

Im Wesentlichen sind drei grundsätzliche Verfahrensrichtungen zu unterscheiden, nämlich *pyrometallurgische*, *hydrometallurgische* und *schmelzelektrolytische* Verfahren. Außerdem gibt es prinzipielle Unterschiede zwischen Metallen mit relativ *geringer* Sauerstoffaffinität wie Eisen, Nickel, Kupfer, Cobalt, die mit Kohlenstoff oder Wasserstoff reduziert oder als Metall aus wässriger Lösung abgeschieden werden können, und Metallen *hoher Sauerstoffaffinität* wie Aluminium, Titan, Magnesium, deren Herstellung kompliziertere Verfahrensweisen erfordert. Die pyrometallurgischen Verfahren werden bereits sehr lange und noch immer am meisten angewendet. So wichtige Gebrauchsmetalle wie Blei, Cobalt, Eisen, Kupfer, Nickel, Titan werden überwiegend oder vollständig pyrometallurgisch hergestellt.

1.1.1 Erzaufbereitung

Das im Tage- oder Bergbau geförderte Erz ist für eine direkte Weiterverhüttung i. Allg. nicht geeignet, sondern bedarf je nach Zustand und Zusammensetzung einer mehr oder weniger aufwendigen *Aufbereitung*. Diese Aufbereitung umfasst häufig eine *Konzentration* der metallhaltigen Erzkomponente (Anreicherung), vielfach auch ein so genanntes *Stückigmachen* des Erzkonzentrats. Mit der Anreicherung soll ein möglichst großer Teil der *unerwünschten Begleitsubstanzen*, insbesondere das als *Gangart* bezeichnete Begleitgestein, vom Erz abgetrennt werden. Zunächst wird das Erz gebrochen, zerkleinert und gegebenenfalls gemahlen. In manchen Fällen erfolgt der Bruch beim Zerkleinern des Roherzes an den Grenzflächen der verschiedenen Erzbestandteile, so dass sie auf diese Art und Weise bereits voneinander gelöst und mit Hilfe verschiedener Trennverfahren getrennt werden können. Manche Trennverfahren nutzen die unterschiedliche Dichte von Erz- und Gangartpartikeln, andere beispielsweise das magnetische Verhalten bestimmter Eisen- und Nickelerze.

Ein sehr wichtiges Trennverfahren ist die so genannte *Flotation* (Abb. E.1-1). Bei der Flotation werden nach einer Feinmahlung des Erzes auf Partikelgrößen $\varnothing \leq 0,2$ mm die Erzteilchen von den Gangartteilchen in einer wässrigen Suspension dadurch getrennt, dass die Erzteilchen durch oberflächenaktive, so genannte Sammlersubstanzen an ihrer Grenzfläche wasserabweisend (hydrophob) eingestellt werden. Wegen ihrer Nichtbenetzung durch Wassermoleküle binden sich die Erzteilchen an feine, durch so genannte Schäumersubstanzen stabilisierte Luftbläschen, die durch den Flotationsbehälter hindurchperlen, an und werden von diesen durch Auftriebswirkung nach oben getragen. An der Oberfläche wird ein mit Erz um einen Faktor bis 10 angereicherter Schaum abgezogen.

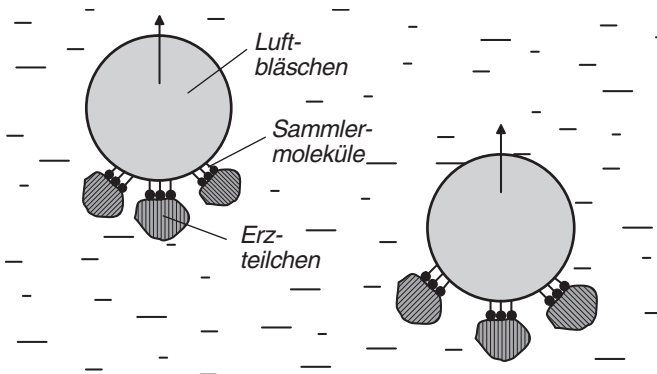


Abb. E.1-1 Erzangereicherung durch Flotation (nach Lit. E.8)

Die Feinmahlung des Erzes ist jedoch für eine Verhüttung in einem Schachtofen (z. B. Hochofen), in dem das zu einer Schüttsäule angeordnete Erz von einem Reaktionsgas durchströmt werden soll, ungeeignet. Das Feinerz wird in diesem Fall durch *Pelletieren* oder durch Sintern zu Stückchen geeigneter Größe und ausreichender Druckfestigkeit weiterverarbeitet (so genanntes Stückigmachen). Beim Pelletieren wird das gegebenenfalls mit etwas Bindemittel versehene, angefeuchtete Erzpulver in einem rotierenden Behälter zu kugelförmigen Pellets mit etwa 10 mm Durchmesser gerollt, danach getrocknet und gebrannt. Das Pelletieren kommt mehr

bei oxidischen als bei sulfidischen Erzen zur Anwendung. Bei den meist sulfidischen Erzen der *Nichteisenmetalle* wird das Stückigmachen oftmals mit dem Röstprozess kombiniert, indem das *Rösten* auf einem Band erfolgt und die Erzteilchen dabei zu einem porösen Sinterkuchen zusammenbacken. Dieses Röstgut wird anschließend gebrochen und bis zur gewünschten Teilchengröße zerkleinert.

Mit dem Rösten soll ein Erz in einen für die Verhüttung günstigeren Verbindungszustand gebracht werden. So werden vielfach sulfidische Erze in besser lösliche sulfatische oder in besser reduzierbare oxidische umgewandelt. Auch das Chlorieren von Titandioxid zum leichter behandelbaren Titanetrachlorid ist als Röstprozess zu verstehen. Ob ein sulfidisches Erz durch Rösten in ein oxidisches umgewandelt werden kann, hängt von der Affinität des Metalls zu Schwefel und zu Sauerstoff ab. Eisen besitzt eine größere Affinität zu Sauerstoff als zu Schwefel, folglich kann Eisensulfid beim Rösten zu Eisenoxid oxidiert werden, Kupfersulfid dagegen nicht, weil Kupfer eine größere Affinität zu Schwefel aufweist als zu Sauerstoff.

1.1.2 Herstellung des Rohmetalls

1.1.2.1 Pyrometallurgie

Die pyrometallurgische Metallgewinnung erfolgt i. Allg. in zwei Teilprozessen, nämlich dem *Schmelz-* und dem *Konverterprozess*. In beiden Prozessstufen – die meist in getrennten Aggregaten ablaufen, bei der Kupferverhüttung teils auch schon zu einem kontinuierlichen Schmelz- und Konverterprozess zusammengefasst sind – findet eine weitgehende Abtrennung der Gangart und unerwünschter Begleitelemente statt. Außerdem wird in einem der beiden Verfahrensschritte die metalltragende Erzkomponente zum Rohmetall reduziert. Die dabei entstehenden störenden Reaktionsprodukte – meist Oxide, gelegentlich auch Sulfide – lösen sich in einer flüssigen Schlackenphase, sofern sie den Reaktionsraum als gasförmige Verbindungen nicht ohnehin verlassen.

Schlacken sind ionische Schmelzen. Aufgrund ihrer in der Regel geringeren Dichte trennt sich die Schlackenphase von der schwereren Metallkomponente und kann separat abgezogen werden. Bis auf wenige Ausnahmen wird jede pyrometallurgische Operation mit einer Schlackenphase durchgeführt. Seltener geschieht dies nur zum Schutz der i. Allg. sehr reaktiven Metallschmelze gegen die umgebende Atmosphäre mit einer Abdeckschlacke; überwiegend wird eine reaktive Schlacke aufgebaut, die über die reine Abschirmfunktion hinaus noch bestimmte metallurgische Aufgaben erfüllen soll und zu diesem Zweck eine eigens auf die Reaktionspartner abgestimmte Zusammensetzung aufweist. Im Stadium der Rohmetallgewinnung wird die Schlacke von den meist silicatischen Bestandteilen der Gangart, den Oxiden der Schmelzcharge und einem zuzugebenden Flussmittel, das den Schmelzpunkt der Schlacke hinreichend erniedrigt, gebildet. Obwohl das Arbeiten mit einer Schlacke als ein unverzichtbarer Bestandteil pyrometallurgischer Vorgänge anzusehen ist, sollte die anfallende Schlackenmenge aus verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Gründen

immer möglichst klein gehalten werden. Erreichen lässt sich dies vor allem mit einer möglichst weitgehenden Erzaufbereitung.

Wichtig für das metallurgische Verhalten einer Schlacke ist deren **Basizität**. Der basische oder saure Charakter einer Schlacke richtet sich nach der Art und Menge der in ihr enthaltenen Oxide. Oxide von Metallen wie CaO oder MgO ergeben als Basenanhydride ein basisches Verhalten, Oxide von Nichtmetallen wie SiO₂ oder P₂O₅ führen als Säureanhydride zu einem sauren Verhalten. Entscheidend ist, dass bei der Neutralisation eines sauren Oxids, z. B. SiO₂ mit einem basischen Oxid, z. B. CaO, ein niedriger schmelzendes Produkt gebildet wird. Daraus folgt auch, dass ein saures Oxid von einer basischen Schlacke aufgenommen wird und umgekehrt, und dass ein saures Oxid als *Flussmittel* für ein basisches Oxid und umgekehrt verwendet werden kann.

Bei vielen Schmelzprozessen dienen Quarz (SiO₂) oder Kalk (CaO) als Flussmittel für die Gangart und die in der Schmelze vorhandenen Oxide. Zur Abschätzung der Schlackeneigenschaften kann ein Basizitätsgrad B

$$B = \frac{\sum \text{basische Oxide}}{\sum \text{saure Oxide}}$$

herangezogen werden, der im Fall $B > 1$ ein basisches, im Fall $B < 1$ ein saures Schlackenverhalten anzeigt. Manche Oxide wie Al₂O₃ verhalten sich amphoter, d. h., in stark saurem Milieu wirken sie wie ein basisches Oxid und in stark basischem Milieu wie ein saures Oxid.

Der Schmelzprozess kann in zwei unterschiedlichen Formen vor sich gehen, entweder als *Reduktionsschmelzen* (z. B. Hochofenprozess) oder als *Steinschmelzen* (z. B. Kupferverhüttung). Einem Reduktionsschmelzen werden in erster Linie oxidische Erze unterworfen. Hierbei findet neben der über die Schlacke erfolgenden Entfernung der erheblichen Verunreinigungen gleichzeitig auch eine Reduktion des Metalloxids zum Rohmetall statt. Die Reduktionsbedingungen sind allerdings so einzustellen, dass möglichst nur das Metalloxid reduziert wird und die Bestandteile der Gangart sowie die unerwünschten Begleitelemente als Oxide in der Schlacke verbleiben. Als wirksame und gleichzeitig wirtschaftliche **Reduktionsmittel** kommen vor allem *Kohlenstoff* und *Wasserstoff* in Betracht, seltener wird die Nichtmetallkomponente an ein billigeres Metall, wie Natrium oder Magnesium im Fall der Titangewinnung, gebunden.

Für die Metallurgie ist von entscheidender Bedeutung, dass die Reduktionskraft von Kohlenstoff, d. h. seine Affinität zu Sauerstoff mit steigender Temperatur zunimmt, während sie bei anderen Substanzen zu höheren Temperaturen hin abnimmt. In Abbildung E.1-2 ist die Bildungsenthalpie für die Oxidbildung verschiedener Elemente in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Im obereren Bereich des Diagramms mit niedriger(!) Bildungsenthalpie erscheinen die Edelmetalle, im unteren Bereich mit hoher Bildungsenthalpie die stark sauerstoffaffinen Metalle.

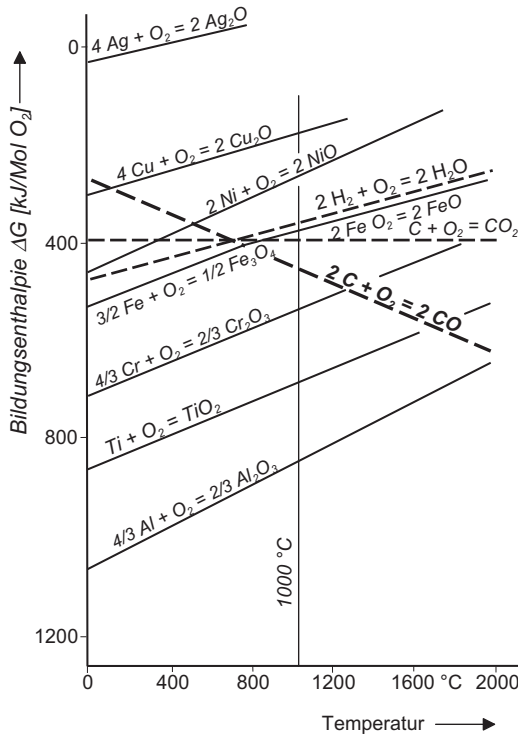


Abb. E.1-2 Bildungsenthalpien von Metall/Metalloxyd-Reaktionen in Abhängigkeit von der Temperatur (Richardson-Ellingham-Diagramm, nach Lit. E.9)

Je größer die Bildungsenthalpie einer Metall/Metalloxyd-Reaktion, um so stabiler ist das jeweilige Oxid und um so schwieriger ist seine Reduktion. Zum Beispiel können bei einer Temperatur von 1 000 °C Eisen- oder Nickeloxid durch Kohlenstoff reduziert werden, nicht jedoch Titan- oder Aluminiumoxid. Dem Diagramm kann auch der interessante Hinweis entnommen werden, dass Wasserstoff bei niedrigen Temperaturen ein effektiveres Reduktionsmittel als Kohlenstoff ist.

Als *Stein* oder *Matte* wird ein Gemisch verschiedener Metallsulfide bezeichnet, z. B. das Gemisch aus Kupfersulfid Cu_2S und Eisensulfid FeS als Kupferstein. Das Steinschmelzen stellt also nur den ersten pyrometallurgischen Verhüttungsschritt sulfidischer Kupfer- und Nickelerze dar. Es zielt auf eine Entfernung der Gangart und der beim Rösten von unerwünschten Begleitelementen gebildeten Oxide durch Schlackenbildung ab.

Meist schließt sich dem Reduktions- und dem Steinschmelzen ein so genanntes **Frischen** des Rohmetalls bzw. des Steins in einem Blaskonverter an. Der Frischprozess ist ein selektiver Oxidationsprozess, bei dem durch Ein- oder Aufblasen von Luft bzw. Sauerstoff der größte Teil der in der Schmelze noch verbliebenen Verunreinigungselemente oxidiert und in die durch Zugaben gebildete Konverterschlacke verdrängt wird (Abb. E.1-3). Im Konverter fällt natürlich eine sehr viel geringere Schlackenmenge

an als im Schmelzofen. Die im Konverter erreichte Reinheit genügt i. Allg. nicht den gestellten Anforderungen; eine anschließende Raffination des Rohmetalls zum Reinmetall ist praktisch immer vonnöten.

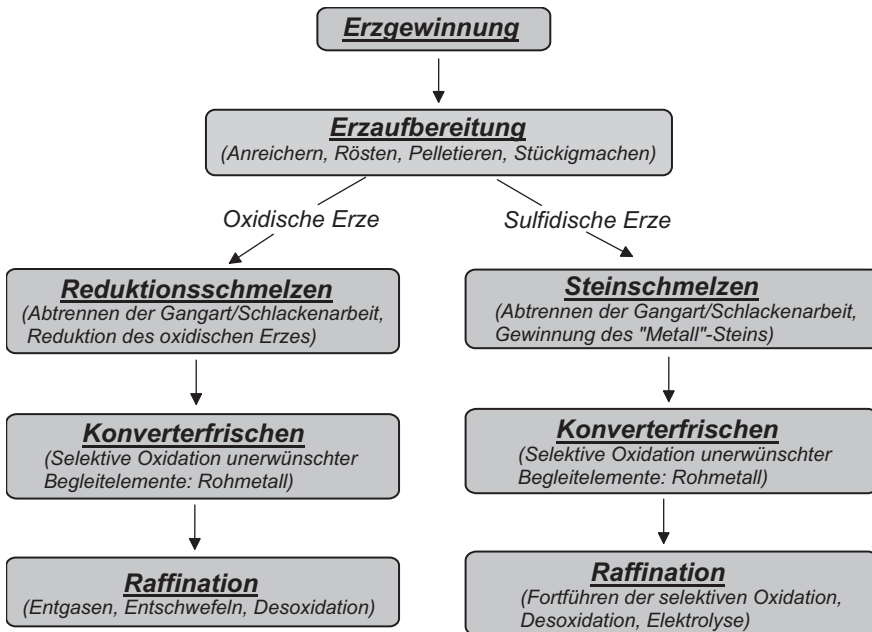


Abb. E.1-3 Verfahrensschritte der pyrometallurgischen Metallgewinnung (schematisch)

1.1.2.2 Hydrometallurgie

Bei der hydrometallurgischen Metallgewinnung wird die Metallkomponente mit einer reaktiven Flüssigkeit – häufig Schwefelsäure, manchmal Ammoniak – aus dem Erz herausgelaugt. Die *Erzlaugung* kann sowohl am gefördertem und aufbereitetem Erz in Behältern oder im Freien an großen Erzanhäufungen als auch unter günstigen Bedingungen, d. h. poröses Erz und undurchlässiges Umgebungsgestein, direkt in der Erzgrube stattfinden. Das Verfahren verläuft zwar vergleichsweise langsam, ist aber durch einen gegenüber üblichen Abbaumethoden geringen Verfahrensaufwand verhältnismäßig kostengünstig. Die Reaktionsgeschwindigkeit lässt sich jedoch bei optimaler Wahl der Verfahrensparameter wie Temperatur, Druck, Reaktionsatmosphäre u. a. m. beachtlich steigern. Hydrometallurgische Erzlaugung empfiehlt sich bei Erzen, die für eine wirtschaftliche pyrometallurgische Verhüttung zu „arm“ oder ungeeignet sind. Sie gelangt u. a. bei verschiedenen Kupfer-, Nickel- und Cobalterzen zur Anwendung.

Die angereicherte Lösung erfährt nach entsprechender Reinigung eine chemische oder elektrolytische Behandlung, mit der das ionisch gelöste Metall abgeschieden wird. Die

chemische *Ausfällung* kommt beispielsweise durch Verdrängung der Metallionen mit einem aktiveren, aber billigeren Metall zu Stande (z. B. $\text{Cu}^{++} + \text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + \text{Cu}$). Auch können aus einer Lösung von Kupfer und Nickel die Kupferionen durch in Lösung gehendes Nickelpulver als Kupferniederschlag ausgefällt werden.

Das *elektrolytische Metallabscheiden* ist zwar teurer als die chemische Ausfällung, es liefert aber reinere Produkte und spart somit die Kosten einer weiteren Raffination. Ist eine Raffination des ausgefallenen Metalls erforderlich, so kommen auch hier grundsätzlich die gleichen Raffinationsverfahren wie bei der pyrometallurgischen Metallgewinnung in Frage.

1.1.2.3 Schmelzflusselektrolyse

Sehr unedle Metalle können aus wässrigen Elektrolyten nicht abgeschieden werden. Bei den erforderlichen Potenzialen käme es hauptsächlich zu einer Zersetzung des Wassers. Daher müssten eigentlich ihre geschmolzenen Metallverbindungen elektrolytisch getrennt werden. Dies stößt wegen der allgemein hohen Schmelztemperaturen, z. B. der Metalloxide, auf beträchtliche Schwierigkeiten. Als Ausweg bietet sich eine Lösung der Metallverbindung in einem niedriger schmelzenden, wasserfreien Elektrolyten an. Bei der Herstellung von Aluminium dient das geschmolzene Mineral *Kryolith* $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$ als Lösungsmittel für Aluminiumoxid Al_2O_3 . Beide Verbindungen bilden bei 10 % Al_2O_3 ein bei 962 °C schmelzendes *Eutektikum*, während die Schmelztemperaturen von Kryolith und von Al_2O_3 1 008 °C bzw. 2 050 °C betragen.

1.1.3 Herstellung des Gebrauchsmetalls

1.1.3.1 Raffination des Rohmetalls

Die Reinigung des Rohmetalls kann über drei verschiedene Arten von Raffinationsverfahren vorgenommen werden. Die größte Bedeutung kommt wiederum pyrometallurgischen Methoden zu, aber auch das Raffinieren auf elektrolytischem Wege wird – meist als eine weitere Raffinationsstufe – vor allem bei der Kupferherstellung in beträchtlichem Umfang angewendet. Im Vergleich hierzu spielen chemische Raffinationsmethoden eine eher begrenzte Rolle.

Pyrometallurgische Raffination bedeutet, dass das Metall im Schmelzzustand gereinigt wird. Die Atome der verunreinigenden Elemente sind im geschmolzenen Metall gelöst. Jede Art der Raffination läuft dann darauf hinaus, Umstände herbeizuführen, unter denen die Löslichkeit der Schmelze für das verunreinigende Element geringer ist. Dies kann durch Druck- (Vakuumentgasen, Inertgasspülen) oder Temperaturänderung (Ausscheiden, Zonenschmelzen, Destillieren), vor allem aber auch dadurch erfolgen, dass der Schmelze – wie schon beim Frischen – Stoffe zugesetzt werden, die eine höhere Affinität zum verunreinigenden Element besitzen als das Metall und in der Schmelze unlösliche Reaktionsprodukte bilden. Die unlöslichen Reaktionsprodukte

sollten sich leicht von der Schmelze trennen, d. h. als Gase (z. B. Entschwefeln, Entkohlen mit Sauerstoff) oder als feste Partikel (z. B. Desoxidieren von Eisen mit Aluminium) oder leichtere Schlackenprodukte (z. B. Entschwefeln mit Kalk) in der Schmelze aufsteigen.

Das *elektrolytische Raffinieren* läuft zwar recht langsam ab und stellt damit ein relativ teures Verfahren dar, es besitzt aber gegenüber pyrometallurgischen Methoden zwei wichtige Vorteile. Erstens sind deutlich höhere Reinheiten erreichbar; zweitens können teure Begleitelemente wie *Edelmetalle* vom Basismetall separiert und damit gewonnen werden. Bei der elektrolytischen Raffination wird das meist schon pyroraffinierte und zu möglichst ebenen und glatten Anodenplatten gegossene Metall unter der Wirkung eines äußeren Potentials in einem Elektrolyten anodisch gelöst und an einem dünnen hochreinen Kathodenblech abgeschieden.

Unedlere Metalle gehen ebenfalls im Elektrolyten in Lösung und reichern ihn an. Liegt das Abscheidopotenzial dieser Verunreinigungen in der Nähe des abzuscheidenden Metalls, besteht die Gefahr ihrer Mitabscheidung an der Kathode. In diesem Fall wird der Elektrolytraum zwischen Anode und Kathode mit einem Diaphragma getrennt, der Anodenelektrolyt herausgeführt und die störende Verunreinigung durch Fällung entfernt. Erst der entsprechend gereinigte Elektrolyt gelangt dann an die Kathode. Auch wenn das Abscheidopotenzial der Verunreinigungen nicht in kritischer Nähe zum Potential des Metalls liegt, ist der Elektrolyt kontinuierlich oder in gewissen Zeitabständen zu regenerieren, da das Abscheidopotenzial konzentrationsabhängig ist. Edelmetalle gehen aufgrund ihres Potentials nicht in Lösung, sondern fallen mit zunehmender Auflösung der Anode dort als so genannter Anodenschlamm zu Boden.

Bei *chemischen Raffinationsmethoden* wird entweder eine flüchtige Metallverbindung (z. B. Ni-Carbonyl) gebildet oder das interessierende Metall aus dem Rohmetall durch selektives Herauslaugen extrahiert. Aus der gasförmigen Verbindung oder der flüssigen Lösung kann das Metall dann durch thermische Zersetzung oder durch Abscheidung in relativ reiner Form gewonnen werden.

1.1.3.2 Legieren

Die Herstellung technischer Legierungen erfolgt praktisch immer im Schmelzzustand, weil nur dann eine ausreichend schnelle und gleichmäßige Verteilung der Legierungszusätze und auch eine ausreichende Löslichkeit gewährleistet sind. Aus verschiedenen Gründen (Schmelzpunkt, Wirtschaftlichkeit, Oxidationsempfindlichkeit, Herstellbarkeit) verwendet man meist keine Reinmetallzusätze, sondern so genannte *Vorlegierungen*, bei denen der Legierungszusatz bereits an das Basismetall gebunden ist. Zum Beispiel dienen für das Legieren von Stahl so genannte *Ferrolegerungen* wie Ferromangan, Ferrochrom, Ferrotitan u. a., die aus eisenreichen Erzen gewonnen werden. Auf eine aufwendige metallurgische Abtrennung der Eisenkomponente kann dann verzichtet werden. Der Eisenanteil der häufig kohlenstoffreichen Ferrolegerungen liegt meist unter 50 %.

Entscheidend für den Zeitpunkt der Legierungsmittelzugabe ist die Frage, wie sich das Legierungsmetall bei den noch ausstehenden metallurgischen Arbeitsschritten verhält. Sauerstoffaffine Zusätze wie Chrom, Titan, Aluminium sollten erst nach einer eventuell durchzuführenden Oxidation und unter neutralen oder reduzierenden Bedingungen zugefügt werden, da sie ande-

renfalls unter Oxidbildung (so genannter *Abbrand*) weitgehend verloren gingen. Weiterhin ist darauf zu achten, dass zum Aufschmelzen des Legierungsmittels noch genügend Heizenergie und bis zum Abgießen noch genügend Zeit für die Verteilung des Legierungselementes zur Verfügung stehen. Weniger sauerstoffaffine Legierungselemente, wie Nickel oder Cobalt, werden häufig durch Zugabe von legiertem Schrott eingebracht, so dass vor dem Abstich bzw. Abguss nur noch eine Korrektur der Legierungszusammensetzung vorgenommen zu werden braucht.

1.1.4 Gießen und Verformen

Das Abgießen des schmelzflüssig gewonnenen Metalls kann auf zwei verschiedene Arten vor sich gehen, und zwar als **Blockguss** in einzelne, stehende Kokillen oder kontinuierlich als **Strangguss** (Abb. E.1-4). Die optimale Gießtemperatur liegt etwa 50 °C über der jeweiligen Liquidustemperatur, sowohl zu niedrige als auch zu hohe Gießtemperaturen können zu fehlerhaften Blöcken bzw. Strängen führen.

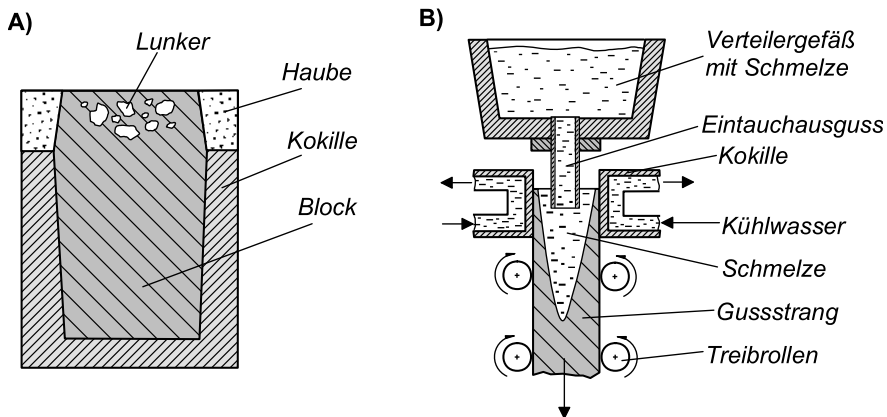


Abb. E.1-4 Rohguss; A) Blockguss, B) Strangguss

Um beim Blockgießen zu einem möglichst kleinen bzw. flachen Kopflunker zu kommen (vgl. F 1.1.2.1), erweitert man die Blockkokille nach oben hin oder setzt zusätzlich eine wärmeisolierende Haube auf, die möglicherweise noch mit einer wärmeliefernden Auskleidung versehen ist. Solche Auskleidungen enthalten beispielsweise metallisches Aluminiumpulver, das bei Berührung mit flüssigem Stahl exotherm abbrennt. Aufgrund bedeutender wirtschaftlicher, aber auch technologischer Vorteile hat das Stranggießen den Blockguss nun auch bei Stahl so gut wie vollständig verdrängt. Das Blockgießen hat nur noch für die Herstellung von Spezialsorten, die in geringer Menge anfallen, Bedeutung.

Als Gießform dient beim Strangguss eine wassergekühlte, nach oben und unten offene Kupferkokille, die in ihren Abmessungen – teils sogar während des Gießens – in Grenzen verändert werden kann. In der Kokille erstarrt die kontinuierlich zulaufende Schmelze nur in einer vergleichsweise dünnen Randschicht von 10 bis 15 mm

Dicke. Der im Kern noch flüssige Strang wird nach unten durch Führungsrollen mit kontrollierter Geschwindigkeit abgezogen, umgelenkt, gerichtet und nach mittlerweile vollständiger Durcherstarrung zu Strangstücken gewünschter Länge getrennt. Die *wirtschaftlichen Vorteile* des Stranggießens liegen in dem mehr automatisierten, damit weniger personalintensiven Ablauf und einem geringeren nachfolgenden Verformungsaufwand, wodurch beträchtliche Betriebs- und Anlagekosten gespart werden. Außerdem wird wegen des praktisch fehlenden Lunkervolumens ein höheres Materialausbringen erreicht. Vom *technologischen Standpunkt* aus erweist sich das Stranggießen wegen eines feineren und homogeneren Gussgefüges als überlegen, das durch eine höhere Unterkühlung der Schmelze sowie insgesamt einheitlichere Erstarrungsbedingungen zu Stande kommt.

Das als Strang oder Block erstarrte Metall erfährt in jedem Fall eine anschließende Warmverformung (*Primärverformung*), die nur bedingt auf eine bestimmte Formgebung (*Halbzeug*) abzielt, vielmehr in erster Linie über eine Zertrümmerung der groben und heterogenen Gussstruktur und deren Rekristallisation zu einem gleichmäßigen und feinkörnigen Umformgefüge führen soll. Zudem können bei dieser Warmverformung innere Hohlräume wie Poren oder Lunker, deren Randflächen nicht oxidiert sind, verschweißen. Als Umformverfahren kommen je nach späterer Halbzeugform (Blech, Stange, Profil, Schmiederohling) Walzen und Schmieden, bei Al- und Cu-Werkstoffen in großem Umfang auch Strangpressen in Betracht (vgl. F 1.4.4.3).

Andererseits wird aus Kostengründen versucht, das Ausmaß an Primärverformung auf das technologisch noch unbedingt notwendige Minimum zu reduzieren, indem die Schmelze in einen schmalen von zwei rotierenden Walzenkörpern gebildeten Spalt gegossen wird. Die Qualität des bei diesem als **Bandgießen** bekannt gewordenen Verfahren entstehenden Primärgefüges ist dank hoher Zugaben an Fremdkeimmitteln für viele Anwendungen ausreichend, so dass über die Alternative „konventioneller Strang- oder verformungsarmer Bandguss“ i. Allg. nach wirtschaftlichen Kriterien entschieden wird.

Der Verarbeitungsweg „Block-/Strang-/Bandguss-Warmverformen“ betrifft natürlich nur die so genannten *Knetwerkstoffe*. *Gusswerkstoffe* werden in der Hütte in Metall- oder Sandformen zu kleineren, einfach und leicht handhabbaren Barren (so genannte *Masseln*) vergossen und in dieser Form von Gießereien als Rohmaterial bezogen.

1.2 Eisen und Stahl

Die außergewöhnliche technische Bedeutung von Eisen spiegelt sich in seiner Verwendung als Basismetall für eine Fülle unterschiedlicher Gusseisen- und Stahlsorten wieder. Hinsichtlich Preiswürdigkeit, Verfügbarkeit und Vielfalt wichtiger Eigenschaften übertrifft es andere Metalle bei weitem. Die Herstellung von Gusseisen und Stahl geht in erster Linie von im Hochofen erzeugtem Roheisen aus, hinzukommen der in großen Mengen wiederverarbeitete Schrott und ein noch recht bescheidener Anteil von durch Direktreduktion gewonnenem Eisenschwamm (vgl. Abb. E.1-15).

1.2.1 Herstellung von Eisen

1.2.1.1 Hochofenverfahren

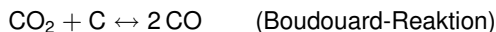
Die Hauptreaktion des Hochofenprozesses besteht in der *Reduktion von Eisenerz* mit Hilfe von Kohlenmonoxid zu einer stark verunreinigten und kohlenstoffreichen Eisenschmelze, dem *Roheisen*. Die wichtigsten eisenhaltigen Minerale in Eisenerzen sind die Oxide Hämatit (Fe_2O_3) und Magnetit (Fe_3O_4).

Unter den Reaktionsbedingungen des Hochofens werden nicht allein die Oxide des Eisens reduziert, sondern auch andere im Erz enthaltene Verbindungen, deren Reduktionsprodukte zur Verunreinigung des Roheisens beitragen. *Phosphorverunreinigungen* stammen beispielsweise aus der Verbindung Apatit ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). Bei einer silicatischen Gangart werden mit dem Erzeinsatz Ca-haltige Zuschläge in den Hochofen eingebracht, um bei einem CaO/SiO₂-Verhältnis von etwa 1 eine leichtflüssige Schlacke zu erhalten. Die Zuschläge sind vor allem Kalkstein (CaCO_3) oder Dolomit ($(\text{CaMg})\text{CO}_3$). Die Carbonate zersetzen sich unter CO₂-Abspaltung zu Oxiden. Mit dem „gebrannten“ Kalk CaO wird ein großer Teil des vorwiegend mit Koks eingeschleppten *Schwefels* als CaS abgebunden und verschlackt, eine vollständige bzw. ausreichende *Entschwefelung* im Hochofen ist jedoch aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich, so dass dem Entschwefelungsproblem auch außerhalb des Hochofens noch eine erhebliche Bedeutung zukommt.

Abbildung E.1-5 gibt einen Querschnitt des *Reduktions- und Schmelzaggregats* „Hochofen“ wieder. Der feuerfest ausgekleidete Hochofen wird von oben wechselweise mit Erz zuzüglich Zuschlägen (Möller) und Koks beschickt. Die schlackebildenden Zusätze sind dem Erz bereits bei seiner Aufbereitung zu Sinter oder Pellets in abgestimmter Dosierung zugefügt worden, so dass eine getrennte Chargierung von Erz und Zuschlägen entfallen kann.

Der Koks dient einerseits als Brennstoff zur Erzeugung der hohen Reaktions- bzw. Schmelztemperaturen, andererseits zur Erzeugung von Kohlenmonoxid CO, das im Hochofenprozess als Reduktionsmittel wirkt. Zur Verbrennung des Kokes wird auf ca. 1100 °C vorgewärmte Heißluft im unteren Ofenbereich eingeblasen. An *Hochofenkoks* werden hinsichtlich Festigkeit, Porosität und Stückgröße bestimmte Anforderungen gestellt, da die Reduktion des festen Erzes durch gasförmiges CO erfolgt und hierfür eine ausreichende Durchströmbarkeit des Hochofeneinsatzes gegeben sein muss.

Für die Vorgänge im Hochofen ist das so genannte *Boudouard-Gleichgewicht* zwischen C, CO und CO₂ bestimmend. Gemäß der Reaktion



wird das bei der Reduktion von Eisenoxid durch CO entstandene CO₂ durch Reaktion mit Kohlenstoff wieder zu CO zurückgebildet und steht für eine Reduktion erneut zur Verfügung.

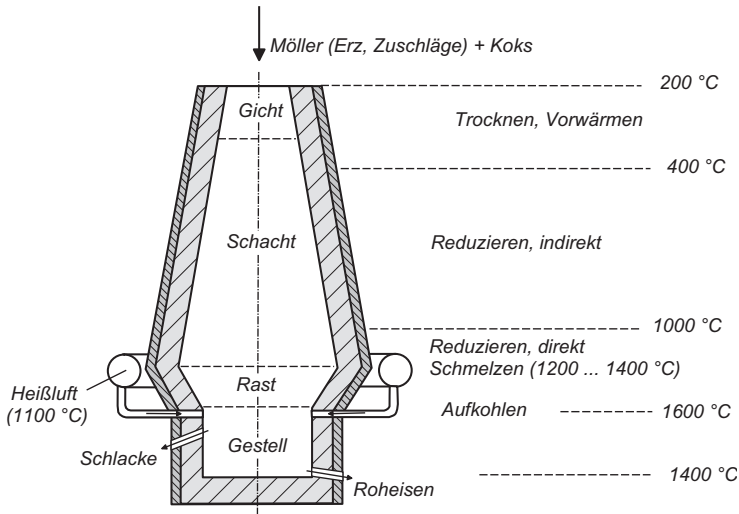


Abb. E.1-5 Hochofen

Dem in Abbildung E.1-6 dargestellten Diagramm ist zu entnehmen, dass das Gleichgewicht oberhalb von etwa 1000 °C ganz auf der rechten Seite, also auf der CO-Seite, und unterhalb etwa 450 °C ganz auf der linken Seite, also bei 100 % CO₂ liegt. Die Reduktion von CO₂ zu CO läuft im Hochofen nur bei Temperaturen oberhalb von 1000 °C ab.

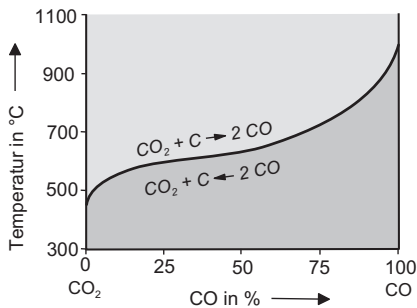
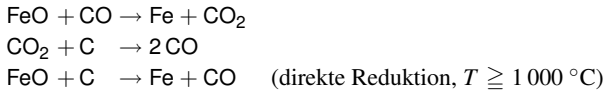


Abb. E.1-6 Boudouard-Gleichgewicht

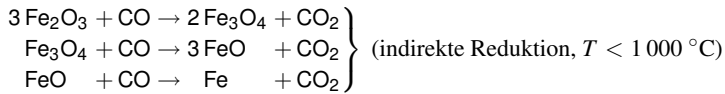
Im Hochofen verbrennt der Koks direkt vor den Eintrittsdüsen der Heißluft nach der stark *exothermen* Reaktion: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$, die Temperaturen von über 2000 °C liefert. Dieses CO₂ wird jedoch in der weiteren Umgebung entsprechend dem Boudouard-Gleichgewicht mit Kohlenstoff vollständig in CO umgewandelt: $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2 \text{CO}$. Da diese Reaktion *endotherm* verläuft, ergibt sich in diesem Ofenbereich eine Temperatur von etwa 1600 °C, die in der darüberliegenden Rast zum Schmelzen des reduzierten Eisens und der Schlacke führt.

Die Eisenreduktion vollzieht sich mit Hilfe von Kohlenmonoxid CO, das dabei zu CO₂ oxidiert wird. Bei Temperaturen über 1000 °C setzt sich dieses CO₂ jedoch entsprechend dem Boudouard-Gleichgewicht sofort mit Kohlenstoff zu 2 CO um, so dass die Eisenreduktion scheinbar direkt mit Kohlenstoff stattgefunden hat. Man spricht dann von einer direkten Reduktion, z. B.

$\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$, wobei es sich aber tatsächlich um die Summe zweier Teilreaktionen handelt:



Im Schacht, also bei Temperaturen unter $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ regeneriert sich das bei der Reduktion gebildete CO_2 nicht mehr zu CO , es wird nun von indirekter Reduktion gesprochen. Es laufen im Schacht folgende Reaktionen ab:



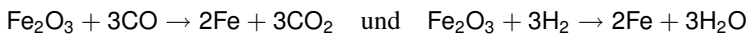
Für den Hochofenbetrieb ist die indirekte Vorreduktion im Schacht bei niedrigeren Temperaturen außerordentlich wichtig. Müßte nämlich im unteren Ofenbereich (Rast) das gesamte Eisenerz aus seinem dreiwertigen Oxidationszustand Fe_2O_3 reduziert werden, so würde diese im Gegensatz zur indirekten Reduktion endotherme Reaktion zu einer unter die Schmelztemperatur sinkenden Ofentemperatur und damit zum Einfrieren des Ofens führen.

Der intensive Kontakt des reduzierten Eisens mit Kohlenstoff hat eine *Aufkohlung* des Eisens bis zu etwa 4 % C zur Folge, womit eine merkliche Erniedrigung des Schmelzpunktes verbunden ist. Schmelzende Schlacke und schmelzendes Roheisen tropfen aus der Schmelzzone ab und sammeln sich im untersten Hochofenbereich, dem Gestell, sie trennen sich dort aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichte. Entstehen große Schlackenmengen, so werden Roheisen und Schlacke über getrennte Öffnungen entleert, anderenfalls erfolgt der Abstich gemeinsam und die Trennung wird außerhalb des Hochofens vorgenommen.

Das vom Hochofen gelieferte Roheisen wird überwiegend zu *Stahl*, ein geringerer Teil zu *Gusseisen* weiterverarbeitet. Je nach weiterer Verwendung werden bereits beim Abstich etwas voneinander abweichende Zusammensetzungen des Roheisens, vor allem im Si- und Mn-Gehalt, angestrebt.

1.2.1.2 Direktreduktions- und Schmelzreduktions-Verfahren

Als *Direktreduktion* wird die Arbeitsweise von Verfahren bezeichnet, die Eisenerz im festen Zustand mit Hilfe eines reduzierenden CO/H_2 -Gemisches zu einem stückigen, porösen Eisenrohprodukt, dem so genannten **Eisenschwamm**, reduzieren. Die Reaktion wird in einem Schachtofen oder in retortenähnlichen Behältern bei 800 bis $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ vorgenommen und läßt sich insgesamt mit den Gleichungen:



beschreiben. Zu beachten ist, dass eine Rückoxidation des Eisens während der Abkühlungsphase unterbleibt. Das Eisen wird daher entweder unter Schutzgasatmosphäre abgekühlt oder im Anschluss an die Reduktion durch Aufkohlung mit einer gegen Rückoxidation weitgehend schützenden Fe_3C -Randschicht versehen.

Das begleitende Ganggestein wird bei der Direktreduktion nicht abgetrennt, sondern muss mit den in ihm noch enthaltenen Verunreinigungen in einem nachfolgenden *Schmelzprozess* an eine entsprechende Schlacke gebunden werden. Eine wichtige Voraussetzung für die Erzeugung von Eisenschwamm ist daher die Verwendung von gut aufbereiteten Eisenerzen mit einem Ganganteil unter 10 %.

In seiner Eignung für die Stahlherstellung ist Eisenschwamm etwa mit Stahlschrott zu vergleichen, wobei gewisse Vorteile auf Seiten des Eisenschwamms liegen. Zu diesen Vorteilen gehören seine gleichmäßige Zusammensetzung, das Fehlen störender Legierungselemente sowie seine für das Einschmelzen und Dosieren vorteilhafte Stückform. Eisenschwamm lässt sich im Lichtbogenofen zu Rohstahl einschmelzen, im Konverterbetrieb als Kühlmittel verwenden oder wird zur Einsparung von Koks dem Hochofenmüller zugeschlagen.

Das Direktreduzieren von Eisenerz zu Eisenschwamm besitzt gegenüber dem Hochofenprozess eine Reihe von Vorteilen. Beispielsweise benötigt es als Heiz- und Reduktionsmittel keinen teuren Hochofenkoks, sondern kann mit Erdgas, Erdöl oder Kohle betrieben werden. Weiterhin erfordert es geringere Anlagekosten und erweist sich im Betriebsablauf und in der gewünschten Produktionsleistung als sehr anpassungsfähig. Dass dieses Verfahren mit einem äußerst geringen Anteil an der Gesamtstahlproduktion hinsichtlich seiner Einführung in die Praxis dennoch weit hinter den allgemeinen Erwartungen geblieben ist, liegt vornehmlich in wirtschaftspolitischen Umständen wie der jeweiligen Energie- und Rohstoffpolitik begründet.

Andere Bemühungen zielen darauf ab, die Direktreduktion von Eisenerz und das Einschmelzen von Eisenschwamm zu Rohstahl in einem zusammenhängenden Prozess miteinander zu verbinden. Auch für solche so genannten Schmelzreduktionsverfahren existieren eine Reihe von Verfahrensvarianten, deren wirtschaftliche Bedeutung gegenwärtig aber noch äußerst gering ist.

1.2.2 Herstellung von Stahl

Während sich bei der Verhüttung von Eisenerz zu Roheisen neue Verfahrensweisen nur sehr zögernd einführen, hat sich im Bereich der Stahlindustrie in wenigen Jahren ein beträchtlicher Wandel der Stahlerzeugungsverfahren vollzogen. Die bis etwa 1960 seit einem knappen Jahrhundert die Stahlherstellung beherrschenden Verfahren nach BESSEMER und THOMAS auf der einen und nach SIEMENS-MARTIN auf der anderen Seite sind durch *sauerstoffblasende Konverter* und elektrisch einschmelzende Öfen (*Elektrostahl*) verdrängt worden.

Eine ähnlich rasante Entwicklung hat auch die Einführung des kontinuierlichen *Stranggießens* an Stelle des sonst üblichen *Blockgießens* genommen. Das Stranggießen hat selbst einen nicht unbedeutenden Einfluss auf die Stahlherstellungsverfahren ausgeübt. So hat es wesentlich zur Entwicklung der so genannten *Pfannen-* oder *Sekundärmetallurgie* beigetragen. Mit der Pfannenmetallurgie sind veredelnde Nachbehandlungen des im Konverter gefrischten oder im Elektroofen eingeschmolzenen Stahles gemeint, die auch bei in großen Mengen herzustellenden Stählen zu einem Qualitätsniveau geführt haben, das bislang nur recht hochwertigen Stählen vorbehalten war.

Da die Qualität eines Stahles vor allen Dingen von seinem Gehalt an unerwünschten, d. h. schädlichen Begleitelementen bestimmt wird und sich hiervon die metallurgi-

schen Maßnahmen bei der Stahlherstellung ableiten, sei zunächst auf die Wirkung solcher Begleitelemente eingegangen.

1.2.2.1 Unerwünschte Begleitelemente

Roheisen enthält je nach Ausgangszusammensetzung des Erzes und metallurgischer Vorgehensweise beim Hochofenprozess im Mittel etwa 4 % Kohlenstoff, 2 % Mangan, 1 % Silicium, 0,5 % Phosphor und 0,05 % Schwefel. Ein solches Roheisen ist vor allem wegen seiner hohen Gehalte an Kohlenstoff, Phosphor und Schwefel bruchempfindlich und nicht verformbar. Seine Weiterverarbeitung zum festen und gleichzeitig zähen Werkstoff „**Stahl**“ bedeutet in erster Linie eine erhebliche Verminderung der schädlichen Gehalte. Bei der hierfür erforderlichen, pyrometallurgisch durchgeführten Behandlung nimmt das Eisen aufgrund seiner im flüssigen Zustand erhöhten Löslichkeit Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff auf. Diese Elemente können selbst bei sehr geringen Gehalten zu schwerwiegenden Versprödungserscheinungen führen, sie sind ebenso wie Phosphor und Schwefel für die meisten Stähle als schädliche Begleitelemente anzusehen.

Phosphor gelangt im Wesentlichen über das Erz in das Roheisen. Er löst sich in der festen Eisenmatrix und verursacht eine *Abnahme der Kerbschlagzähigkeit* und eine *Erhöhung der Übergangstemperatur* in einem solchen Maße, dass generell, insbesondere aber im Hinblick auf rissfreies Schweißen oder Härten, möglichst niedrige Phosphorgehalte angestrebt werden. Außerdem trägt Phosphor zur Versprödung beim Anlassen bei. Die zulässigen Gehalte betragen bei allgemeinen Baustählen 0,05 %, bei härt- und vergütbaren Edeltählen 0,035 %. Bei diesen mittleren Gehalten ist zu beachten, dass Phosphor stark zum *Seigern* neigt und örtliche Konzentrationen, vor allem an Korngrenzen, deutlich über den genannten Werten liegen können. Die Entphosphorung des Roheisens erfolgt bei der Stahlherstellung durch Oxidation („*Frischen*“) und Lösung des sauren P_2O_5 in einer *basischen Schlacke*.

Der **Schwefel**gehalt des Roheisens kann dem Erz, den Zuschlägen, dem Hochofenkoks oder Bestandteilen des Schrotts (z. B. Kautschuk) entstammen. Schwefel ist in festem Eisen nur in äußerst geringen Mengen löslich, er bildet mit Eisen eine bei knapp 1 200 °C schmelzende Verbindung FeS (Abb. E.1-7). Dieses vergleichsweise niedrigschmelzende Sulfid FeS ist spröde und bildet mit Eisen ein bei 1 000 °C schmelzendes binäres sowie mit Fe und FeO ein unter 900 °C schmelzendes ternäres *Eutektikum*. Die jeweiligen eutektischen Restschmelzen erstarren erwartungsgemäß als Korngrenzenfilme. Im Fall des binären Eutektikums Fe-FeS kristallisiert die Eisenphase an die γ -Matrixkörner an, so dass ein dünner Korngrenzenfilm von Eisensulfid zurückbleibt.

Die maßgebenden Eigenschaften von Eisensulfid, nämlich Sprödigkeit und niedriger Schmelzpunkt, bewirken bei dieser Anordnung *Bruchempfindlichkeit* sowohl bei niedrigeren als auch bei höheren Temperaturen. Die Niedrigtemperaturbrüchigkeit zeigt sich beim Warmverformen oberhalb 800 °C und wird dann als *Rotbrüchigkeit*

bezeichnet. Die Hochtemperatur- oder *Heißbrüchigkeit* setzt oberhalb 1 200 °C mit dem Schmelzen des FeS ein. Die Heißrissempfindlichkeit von S-haltigem Eisen ist nicht nur für die Warmverformbarkeit, sondern auch für die Gieß- und Schweißbarkeit sehr schädlich.

Folglich muss der Schwefelgehalt auf unkritische Werte abgesenkt werden, was bereits im Roheisen durch Bindung an Calcium und Entfernung über eine basische Schlacke zwar zu einem großen, aber noch nicht ausreichenden Teil geschah.

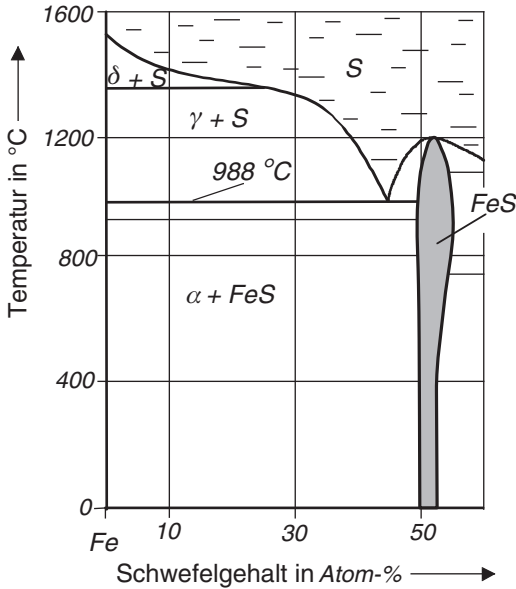


Abb. E.1-7 Zustandsdiagramm Fe-FeS (nach Lit. B.2)

Es wird also auch noch bei der folgenden Stahlherstellung eine weitere Entschwefelung nötig sein. Dann noch verbleibende Schwefelreste werden üblicherweise an das schwefelaffinere Mangan zu MnS gebunden. Dieses Mangansulfid hat den entscheidenden Vorteil, bei etwa 1 500 °C zu erstarren, sich also schon in der Eisenschmelze zu bilden und sich daher innerhalb der später erstarrenden Eisenkörner globular anzuordnen (Abb. E.1-8).



Abb. E.1-8 Anordnung von FeS- und MnS-Einschlüssen in erstarrtem Stahl

Obwohl mit der Bindung des restlichen Schwefels an Mangan sein schädlicher Einfluss zunächst als beseitigt erscheint, werfen die im Stahl verbleibenden *MnS-Einschlüsse*

ein neues Problem auf. Mangansulfid erweist sich nämlich bei der Warmverformung von Stahl als außerordentlich plastisch, so dass die MnS-Teilchen in Verformungsrichtung gestreckt werden. Dadurch werden die mechanischen Eigenschaften richtungsabhängig. In Verformungsrichtung bleiben sie praktisch unverändert, in Quer- und Normalrichtung zur Verformung können jedoch die *Festigkeits-* und *Zähigkeitswerte* stark abnehmen. Gegen die durch MnS-Zeilen hervorgerufene *Anisotropie* hilft entweder eine weitergehende Entschwefelung oder die Verwendung anderer S-affiner Elemente, die im Unterschied zu Mangan harte, nichtplastische Sulfide ausbilden. Hierfür kommen Zirkonium oder Cer in Betracht.

Bei den allgemeinen Baustählen werden Schwefelgehalte bis 0,05 %, bei Edeltählen bis 0,035 % zugelassen. Da Schwefel in Stahl von allen Begleit- und Legierungselementen am stärksten seigert, ist für eine im ganzen Querschnitt sichere Schwefelabbindung ein beträchtlicher Mn-Überschuss erforderlich. Abschließend soll aber auch der günstige Einfluss eines gewissen Anteils an Mn-Sulfid im Gefüge von Stählen auf deren *Zerspanungseigenschaften* hervorgehoben werden (vgl. F 1.5.3.4).

Sauerstoff gelangt durch Kontakt mit der Atmosphäre, insbesondere aber auch durch den Frischvorgang bei der Stahlherstellung in die Eisenschmelze. Im festen Eisen liegt der Sauerstoff wegen außerordentlich geringer Löslichkeit in oxidischer Form vor. Er wirkt schon bei niedrigen Gehalten stark *verspröndend* und muss auch wegen seines ungünstigen Zusammenwirkens mit Schwefel bei der Auslösung von *Heißbrissigkeit* entfernt werden. Höhere Sauerstoffgehalte, die zu einer intensiven *Desoxidation* mit sauerstoffaffinen Mitteln wie Si, Mn, Al zwingen, stellen sich in der Eisenschmelze nur bei geringen C-Gehalten ein, da mit dem Kohlenstoff schon ein stark desoxidierendes Element in der Schmelze gelöst ist. Die von den zuvor genannten Desoxidationsmitteln gebildeten Oxide schwimmen zum überwiegenden Teil in der Schmelze auf und gehen in die Schlacke. Je nach Art der Oxide und der Abscheidebedingungen wird ein gewisser Anteil der Desoxidationsprodukte als nichtmetallische Einschlüsse zurückbleiben. Eine Entgasung mittels Vakuumbehandlung, bei der ja keine festen Reaktionsprodukte entstehen, führt demnach zu einschlussärmeren, reineren Gefügen.

Die Roheisen- oder Stahlschmelze nimmt **Stickstoff** aus der Atmosphäre vor allem beim Abstechen oder Gießen auf. Stickstoff verursacht bei C-Gehalten $\leq 0,01$ %, die als Alterung bezeichnete *Versprödung* von Stahl (vgl. Abb. B.2-26, B.2-27), die auf einer Blockierung von Gleitversetzungen durch Wolken von N-Atomen beruht. Die Blockierungswirkung ist im Temperaturbereich um 300 °C besonders effektiv, weil die Stickstoffatome nun eine Beweglichkeit erlangt haben, die sie zu permanenter Versetzungsblockierung befähigt. Da im Fall eines Sprödbruchs die frische Bruchfläche bei dieser Temperatur blau anläuft, wird die Versprödung bei 300 °C auch als *Blausprödigkeit* bezeichnet.

Die durch Stickstoff verursachte Sprödbruchanfälligkeit von Stahl kann durch Abbinden des Stickstoffs mit einem entsprechend affinen Zusatz unterbunden werden. Es

eignen sich hierfür insbesondere Aluminium, Titan und Niob. Diese Maßnahme führt nicht nur zu einem Verschwinden der Alterungsanfälligkeit, sondern erzeugt auch sehr feine Ausscheidungen, beispielsweise von *Aluminiumnitrid* AlN , die das Wachstum von Austenitkörnern hemmen und so eine *feinkörnige Gefügeausbildung* bewirken. Dies zieht eine niedrigere Übergangstemperatur, also eine verbesserte Zähigkeit nach sich. Darüber hinaus hat sich Stickstoff in letzter Zeit zu dem nach Cr und Ni sowie neben Mo wichtigsten Legierungselement in nichtrostenden bzw. korrosionsbeständigen Stählen entwickelt (vgl. G 7.3.1.2).

Es ist anzunehmen, dass sich **Wasserstoff**-Atome nach dem Lösen im Fe-Gitter als Protonen im Wirtsgitter bewegen. Trotz ihrer geringen Größe verursachen die Protonen wegen ihrer positiven Ladung eine Gitteraufweitung bzw. -verspannung. Die Menge der in dieser Weise bei Raumtemperatur im Gleichgewicht löslichen H-Atome ist außerordentlich klein. Da die Aufnahmefähigkeit des Fe-Gitters für H-Atome mit der Zahl seiner Gitterdefekte stark zunimmt, andererseits aber der Diffusionskoeffizient unerwartet abnimmt, ist zu vermuten, dass ein großer Teil der H-Atome in Gitterfehlstellen „gefangen“ ist. Als Fallen („traps“) für H-Atome fungieren vor allem Versetzungen und innere Grenzflächen wie Korn- und Phasengrenzen. Bei der Ausscheidung von H-Atomen an Grenzflächen besteht die Möglichkeit der Rekombination zu H_2 -Molekülen. Solche Ausscheidungen erfolgen bevorzugt an Sulfideinschlüssen.

Gasmoleküle müssen vor ihrer Lösung sowohl in einer Metallschmelze als auch im Metallgitter zu Atomen dissoziieren. Eine derartige Dissoziation von H_2 -Molekülen findet an Eisen unterhalb von 300 °C praktisch nicht mehr statt. Hingegen ist eine Wasserstoffaufnahme auch bei niedrigeren Temperaturen noch möglich, wenn sich der Wasserstoff an der Eisenoberfläche in Folge einer chemischen oder elektrochemischen Reaktion „*in statu nascendi*“, also *atomar* entwickelt. Dies ist der Fall beim *Säurebeizen*, bei *Wasserstoffkorrosion*, bei *kathodischem Reinigen* oder *galvanischem Beschichten* (vgl. F 1.11.2.2).

Abgesehen von der weiter hinten erwähnten Entkohlungswirkung kann überschüssiger Wasserstoff in Stahl zu spezifischen Rissbildungen und damit zu schwerwiegenden Schädigungen führen. Der schädliche Einfluss kann in zwei sehr unterschiedlichen Erscheinungen zutage treten,

- zum Einen in Form so genannter *Flockenrisse* in meist großen Schmiedeteilen vor allem aus niedriglegierten CrNi- oder CrMn-haltigen Stählen,
- zum Anderen in hochfesten Stählen als so genannte *Wasserstoffversprödung* oder besser *H-induzierte Rissbildung*.

Unter Flocken versteht man rundliche innere Mikrorissbildungen von schneeflockenähnlichem Aussehen, die sich in einem H-haltigen warmverformten Teil beim Abkühlen im Temperaturbereich um 200 °C abspielen. Vielfach gelangt der Wasserstoff schon bei der Stahlherstellung durch feuchte Zusätze oder durch Kontakt der Schmelze mit feuchter Luft in den Stahl; ein Schmiedeteil kann ihn aber auch beim Glühen in

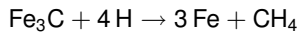
reduzierender H₂-haltiger Atmosphäre aufgenommen haben. Offenbar ist die Ausdiffusion des Wasserstoffs bei großen Teilquerschnitten stark behindert, und es kommt beim Abkühlen wegen der abnehmenden Löslichkeit, die sich beim Übergang $\gamma \rightarrow \alpha$ nochmals um etwa 1/3 verringert, zu starken, möglicherweise lokalen Übersättigungen an Wasserstoff. Diese Übersättigung entlädt sich – durch welchen Mechanismus auch immer – bei etwa 200 °C in der Ausbildung von Flockenrissen. Als einzige Maßnahme gegen das Auftreten von Flocken hilft nur eine Absenkung des Wasserstoffgehalts, in kritischen Fällen auf Werte unter 3 ppm. Dies kann durch extrem langsames Abkühlen, eine längere Temperbehandlung zwischen 200 °C (unlegiert) und 600 °C (höher legiert) oder eine Vakuumbehandlung bei der Stahlherstellung herbeigeführt werden. Hochfeste Stähle ($R_{eH} \geq 1\,000\text{ N/mm}^2$ bzw. $H \geq 350\text{ HV}$) sind, unabhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung, durch so genannte Wasserstoffversprödung gefährdet. Die *Wasserstoffversprödung* äußert sich in einer starken Abnahme der Verformungsfähigkeit, die jedoch nur bei niedriger Beanspruchungsgeschwindigkeit auftritt, also nicht bei der Kerbschlagbiegeprüfung, sondern nur in einem langsam durchgeführten Zugversuch deutlich wird. Als weiteres typisches Merkmal der *H-Versprödung* ist zu beobachten, dass sie sich nur im Temperaturbereich etwa zwischen –100 °C und +100 °C einstellt, was offensichtlich mit einer zu geringen Beweglichkeit der H-Atome bei der niedrigen Temperatur bzw. einer zu großen Beweglichkeit bei der höheren Temperatur zusammenhängt und an die ausgeprägte Stickstoffversprödung bei etwa 300 °C erinnert.

Bei ausreichend hohen Eigenspannungen kann es auch ohne äußere Beanspruchung zu einer Rissbildung kommen, die möglicherweise stark verzögert, d. h. erst längere Zeit nach der Wasserstoffbeladung des Bauteils einsetzt und in eine schrittweise Rissausbreitung mündet. Unter ungünstigen Bedingungen genügt auch hier zur Versprödung ein Wasserstoffgehalt von wenigen ppm. Die *Wasserstoffversprödung* hochfester Stähle wird, da die Wasserstoffbeladung des Bauteils oftmals durch einen Korrosionsvorgang hervorgerufen wird, manchmal auch als *kathodische Spannungsrisskorrosion* bezeichnet. Wasserstoffbedingte Versprödungen bedeuten auch eine ernste Gefährdung hochfester Schweißverbindungen. In diesem Fall wird der Wasserstoff in der Regel über feuchte Zusatzwerkstoffe bzw. -hilfsstoffe in das Schweißbad und damit in die Schweißverbindung eingebracht.

Zur Erklärung der Rissbildungs- bzw. Versprödungsursache werden verschiedene Theorien diskutiert, von denen jedoch keine alle mit der Wasserstoffschädigung von Stahl zusammenhängenden Beobachtungen zu erklären vermag. Die so genannte *Drucktheorie* nimmt an, dass sich bei der Ausscheidung von Wasserstoff und seiner Rekombination zu H₂-Molekülen an inneren Grenzflächen hohe Drücke entwickeln, die das Gefüge an diesen Stellen aufzureißen vermögen. Andere Theorien operieren mit der Senkung der Gitterkohäsion durch Wasserstoff oder der Reduzierung der Brucharbeit in Folge Wasserstoffabsorption an den Rissflächen oder mit der Beeinflussung der Versetzungsbeweglichkeit durch H-Atomwolken. Unstrittig ist, dass neben der Wasserstoffkonzentration und -beweglichkeit das im gefährdeten Gitterbe-

reich wirkende Spannungsfeld eine ganz wichtige Einflussgröße für die H-induzierte Rissbildung und Rissausbreitung darstellt. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um Eigenspannungen oder äußere Lastspannungen handelt. Bei *hochfesten* Stählen ist ja generell mit einem hohen Spannungsniveau sowohl für Eigen- als auch Lastspannungen zu rechnen.

Eine Schädigung ganz anderer Art geht von heißen, wasserstoffhaltigen Gasen aus. Sie vermögen oberhalb 300 °C nach entsprechender Dissoziation in das Eisengitter einzudringen und eine Zersetzung von Eisencarbidteilchen Fe₃C vorzunehmen:



Abgesehen von der durch *Entkohlung* hervorgerufenen Entfestigung führt das entstehende Methangas zur Bildung innerer Hohlräume. Dieser Schädigungsprozess läuft sehr viel schneller und auch schon bei Temperaturen unter 300 °C ab, wenn das wasserstoffabgebende Gas unter erhöhtem Druck steht, ein z. B. in der Erdölverarbeitung sehr oft auftretender Beanspruchungsfall. *Druckwasserstoffbeständige* Stähle müssen daher Carbide enthalten, die gegen eine Zersetzung durch Wasserstoff stabil sind. Erfüllt wird diese Forderung von legierten Stählen, die thermodynamisch stabile Sondercarbide wie Cr-, Mo- oder V-Carbide ausscheiden.

Bei den in einem Stahlgefüge vorhandenen **nichtmetallischen Einschlüssen** oder *Schlacken* handelt es sich in erster Linie um die nicht mehr zur Abscheidung aus der Schmelze gelangten *Desoxidations-* und *Entschwefelungsprodukte* des Siliciums, Mangans und Aluminiums. Es sind also oxidische (SiO₂, MnO, Al₂O₃), sulfidische (MnS) und silicatische (MO · SiO₂, MO = Metalloxid) Verbindungen. Außerdem können solche Einschlüsse auch aus der metallurgischen Schlacke stammen und beim Rühren oder Abgießen in die Schmelze gelangt sein. Eine weitere Quelle stellt die feuerfeste Ausmauerung der Öfen, Tiegel, Pfannen, Kokillen dar, sie kann Partikel durch Lösung oder mechanischen Abrieb an die Schmelze abgeben.

Der Einfluss solcher in der Schmelze unlöslicher Einschlüsse auf die Stahleigenschaften hängt von deren Art und Menge, insbesondere aber auch von ihrer Teilchengröße, -form und -anordnung ab. So kann das harte Al₂O₃ (Tonerde) in größerer Menge einen erheblichen Werkzeugverschleiß bei der zerspanenden Weiterverarbeitung nach sich ziehen. Im Fall stark gerichteter Warmverformung ordnen sich die Einschlüsse, allen voran das plastische Mn-Sulfid, zeilig an. Dieses *Zeilengefüge* wird häufig auch als *Faser* (*Walz-*, *Schmiedefaser*) bezeichnet. Die zeilige Anordnung wirkt sich hinsichtlich Festigkeit und Zähigkeit in Zeilen- bzw. Verformungsrichtung kaum, quer und vor allem senkrecht dazu jedoch je nach Ausprägung mindernd bis katastrophal aus. *Größere Einschlüsse* können bei dynamischer Beanspruchung besonders in hochfesten Gefügen zur Rissbildung führen. Schließlich wird die *Polierbarkeit* eines Stahles, die beispielsweise bei der Herstellung bestimmter Formwerkzeuge wichtig ist, entscheidend von seinem Gehalt an Einschlüssen bestimmt. Es ist einsichtig, dass solche Einschlüsse je nach Menge und Größe die Qualität einer polierten Oberfläche beeinträchtigen würden.

Sachwortverzeichnis

A

- Abbrand 25
- Abbrennstumpfschweißen 159 f.
- Abgastemperatur 355
- Abkühlgeschwindigkeit 140
- , kritische 171, 234, 240
- Ablationskühlung 460
- Abrasion 128
- Abrasionsverschleiß 357–362
- ABS 316
- Abscheiden, aus der Gas-(Dampf-)phase (PVD, CVD) 106, 211
- Abschrecken 175, 226 f., 233 f.
- Abschrecköl 227
- Absorption 377
- a-C 72
- Acrylat-Klebstoff 196
- Acrylharz-Klebstoff 195 f.
- Acrylharzlack 345 f.
- additive Fertigung 280
- Additive Manufacturing (AM) 280
- Adhäsion 128, 189 ff., 193
- Adhäsionsverschleiß 245, 356 f., 359 f., 362, 428, 432
- AFP-Stahl 463, 466
- Aktivator 268, 272
- Aktivgas 147 f.
- Aktivierung 358
- Aktivlötten 326
- Akzeptor 524
- Al₂O₃ 397
- AlCuMg 436 f.
- Al-Gusswerkstoff 439
- Alitieren 353
- Alkohol 55
- Alkydharzlack 345
- Al-Legierung 436
- allgemeiner Baustahl 403 f.
- Al-Li-Legierung 439, 459
- allotrope Umwandlung 224
- AlMg 3 475
- AlMgSi 465
- AlMgSi 1 474
- AlMgZn 1 474
- Alnico-Magnet 577 f.
- Al₂O₃-Faser 396
- Alterung 33, 193
- Aluminieren 211
- Aluminium 179 f., 345, 400, 416, 511
- , Herstellung 46
- , Korrosionsbeständigkeit 497 f.
- Aluminiumguss 80
- Aluminiumnitrid AlN 34
- Aluminium-Werkstoff, Schweißen 179
- aluminothermisches Schweißen 158
- Al-Werkstoff 449
- AlZnMgCu 436, 438
- Amin 55
- Ammoniak-Spaltgas 188, 229
- amorph 300
- amorpher Kohlenstoff 72
- anaerob 196
- anaphoretische Beschichtung 219
- Anguss 295
- Anisotropie 33, 287, 302, 332
- , magnetische 571
- , senkrechte 121
- anlassbeständiger Stahl 250
- Anlassbeständigkeit 405, 424
- Anlassen 249
- , mehrfaches 251
- Anlassfarbe 349
- Anlasssprödigkeit 332
- Anlassstufe 242, 245
- Anlasstemperatur 249, 405
- Anlassverhalten 250
- Anlassversprödung 31, 250
- Anlauffarbe 349
- Anode 202 f.
- , unlösliche 203
- , verbrauchende 203
- Anodisieren 198
- Anstrich 217 f., 344 f.
- Anstrichfilm 217
- Antistatikumittel 63, 563
- ARALL 398

- Aramid-Aluminium-Laminated 398
Aramidfaser 392 f., 441
Arbeitsstahl 424
Argon 147
Ariane 460
Aschebestandteil 352
Ätzen 534
Aufbauschneiden 126, 130
Aufbereitung 17 f., 64
Aufdampfen 212, 326
Aufhärbarkeit 241 f., 248
Aufhärtung 168, 171 f., 174, 240
Aufkohlen 28, 262 ff.
Aufkohlung 29, 257, 262 f., 265 ff.
Aufladung, elektrostatische 563
Aufschmelzen 333
Ausdehnungskoeffizient 462
Aushärten 232–235, 271, 307
Aushärtungsschrumpfung 195
Auskolkung 430
Auskreiden 346
Auslagern 233, 235
Auslassventil 468
Ausscheidung 166
–, an Korngrenzen 332
ausscheidungshärtender ferritisch-perlitischer Stahl 463, 466
Ausschmelzverfahren 82
Austenit 123
Austenitformhärten 255 f.
austenitischer Stahl 175, 177, 359, 487, 490
Austenitisierung 241
Austenitisierungstemperatur 238, 242, 244
austenitstabilisierend 492
autogenes Brennschneiden 136
Autogenschweißen 157
Automatenlegierung 131 f., 135
Automatenstahl 132
AVG-Diagramm 382
- B**
- Bainit 251, 332
Bainitbildung 251
bainitisches Gefüge 171
Bainitstufe, obere 252
–, untere 251
Bake Hardening 463 f.
Bändermodell 506
Bandgießen 26
basische (B) Umhüllung 143
basische Schlacke 37 f.
basischer (B) Elektrodeentyp 143
Basizität 20
BaTiO₃ 580, 583
Bauelement 536
–, optoelektronisches 547
Baustahl, allgemeiner 33, 403 f.
–, schweißbarer 476
Bauteildauerfestigkeit 384
Bauxit 46
Beanspruchungskollektiv 370
Beizen 200
Belüftungselement 491
B-Elektrode 144, 478
Benetzen 185, 191
Bentonit 65
Beryllium 401
Beschichten 76, 199, 341, 362, 430 f.
–, galvanisches 100
Beschichtung 335, 353, 455
–, anaphoretische 219
–, kataphoretische 219
Beschleuniger 59, 195
Bessemer-Verfahren 30, 37 f.
Betriebsbeanspruchung 169, 369
Betriebsfestigkeit 368 ff.
Betriebssicherheit 365
B-Faser 396
Biegung 257 f.
Bindefehler 96, 140, 167
Bindemittel 80, 217, 345
Bindephase, metallische 428
Biphenyl, polychloriertes, PCB 563
Bitumenanstrich 346
Blasen 300, 328
Bläuen 222
Blausprödigkeit 33
Blechschiweißen 159
Blechumformen 119
Blei 344 f., 415 f.
Blei-Zinn-Legierung 187
Bleizirkonat-Titanat 584
Blisk 454
Blockwand 566, 570, 576
Blockcopolymer 59
Blockgießen 25

Blockguss 25, 30
Blockprogramm-Versuch 370 f.
Blockseigerung 91 f., 231
–, umgekehrte 92
Bonden, von Al-Drähten 536
Bondern 221
Booster 459
Bor 244
Borax 187
Borcarbid 433
Borfaser 396
Borid 257
Borieren 257, 274 f., 362
Bornitrid, kubisches 432 f.
Borsäure 184, 187
Boudouard-Reaktion 27 f., 262, 265
Brennatmosphäre 326
Brennen 318, 321, 325
Brennintervall 322
Brennkammer 449, 460
Brennschneiden 136 f.
–, autogenes 136
Brenntemperatur 321
Bruchmechanik 394
Brünieren 223
BY-Behandlung 466

C

Cadmierung 207
Cadmium 207, 342
Cadmium-Quecksilber-Tellurid-Verbindung 527
CAI-Wert 441
Calcinieren 66 f.
Carbid 66, 175, 250, 360, 424, 428 ff., 454
Carbidausscheidung 249
Carbidbildner 487
Carbonisieren 70
Carbonitrid 255, 269
Carbonitrieren 257, 267
Carbonsäure 55
CBN 432 f.
Cer 33
C-Faser 392 ff.
C-Faserverbundwerkstoff 385
CFC-Material 399, 461
CFK-Verbundwerkstoff 395, 446, 454, 462
chemisches Härten 331

Chip 535
Chlophen 563
Chlor 352
chloriert 63
Chlorkautschuklack 345 f.
Chrom 175 f., 342, 492
Chromalitieren 353
Chromatieren 222
Chromitieren 222
CMC 389, 398 f.
CMC-Faserverbundwerkstoff 399
CMT 527
CO₂-Gaslaser 155 f.
CO₂-Treibhauseffekt 484
Cobalt 428
Coil-Coating 220
Co-Legierung 454, 457
Complex-Phasenstahl 464
Compoundieren 63
Compression strength After Impact 441
Cooperpaar 518
Copolymer 59
Cordierit 560
C-Pegel 266
Cr(III) 205, 207
Cr(VI) 205, 207, 222
Crack Closure 372
CrNi-Stahl, aushärtbarer 496
–, austenitischer 494
Cr-Stahl, ferritischer 495
CuAl-Legierung, Korrosionsverhalten 501
CuPb-Legierung 417
CuPbSn-Legierung 417
Curietemperatur 567, 582
CuSn-Legierung 417
–, Korrosionsverhalten 501
CuZn-Legierung 122, 131
–, Korrosionsverhalten 500
CVD-Beschichten 199
CVD-Verfahren 67 f., 212, 215 f.
Cyanacrylsäure-Klebstoff 197
Cyanat 55
Cyanid 267
Czochralski-Methode 528

D

damage tolerance 367, 387
damage tolerant 437

- Dämpfung 422
 Dauerfestigkeit 260, 407, 413
 Dauermagnet 576
 Decarbonisierung 484
 Deckanstrich 347
 Defekt 375
 Defektelektron 522
 Dehäsion 193
 Dehnmessstreifen 516
 Delamination 391, 441
 δ -Ferrit 177
 Dendrit 95
 dendritisch 93 f.
 Denitrieren 89
 Desoxidation 33, 37, 41 f., 89
 diamagnetisch 565
 Diamant 67 f., 71, 432
 –, polykristalliner 432 f.
 Diamantschicht 71
 Diamantsynthese 68
 Dichtung 422
 –, Elastomer- 422
 Dickfilmtechnik 537
 Dickvernickeln 203
 Dielektrikum 552
 –, aktives 558
 –, passives 558
 dielektrischer Verlustfaktor 554
 Dielektrizitätskonstante 553
 Differenzialbauweise 386
 Diffusionsglühen 91, 231
 Diffusionskriechen 451
 Diffusionslegieren 211
 diffusionslos 240
 Diffusionsschicht 269, 271
 Diffusionsschweißen 160 f., 285, 327
 Diffusionssperre 354
 Diffusionsverschleiß 430, 432
 Dimensionsänderung 245
 Diode 539, 542
 Direkthärten 263
 Direktreduktion 29
 dispersionsgehärteter Werkstoff 101
 Dispersionsgrad 236
 Dispersionshärten 236
 DLC-Schicht 71 f.
 Domäne 565
 Domänenstruktur 581
 Donator 523
 Doppelbindung 57
 Doppelsextruder 293
 Doppelhärten 264
 Doppelschneckenextruder 63
 Dotierung 523, 531, 534
 Drahtsteg 378 f.
 dreiachsiges Pressen 106
 3D-Druck 280
 Dreischicht-Verbundlager 418
 Dressierstich 124
 Druck, 3D- 280
 Druckeigenspannung 260, 273, 334
 Druckguss 78 f., 84 f.
 Drucksintern 108
 Druckspannung 113, 263, 323
 –, mehrachsige 113
 Druckspannungszustand 114
 Druck-Umformen 114
 druckwasserstoffbeständiger Stahl 36, 489
 Dualphasenstahl 464
 Dünnschichttechnologie 537
 Dünnschichttechnologie 212
 Duplexstahl 174, 496 f.
 Durchgangswiderstand 555
 Durchhärtung 243
 Durchschallungsverfahren 381
 Durchschlag, elektrischer 557
 Durchschlagfestigkeit 555 f.
- E**
- Edelmetall 24, 51
 –, gediegenes 17
 Edelstahl 33, 405
 E-Glas 392
 Eigenhalbleitung 522
 Eigenspannung 86, 169, 178, 204, 229,
 289 f., 317, 331 ff.
 Eigenspannungszustand 245, 257, 360
 einachsiges Pressen 106
 Einbrand 144
 Einbrennen 326
 Eindringverfahren 375
 Einfachhärten 264
 Einformung 166, 232, 238
 Einhärtbarkeit 228, 242 ff., 248, 251, 405,
 424, 478
 Einhärtetiefe 260

- Einhärtung 240, 250
- Einkomponenten-Klebstoff 195
- Einkristallherstellung 527
- einkristallin 456
- Einkristallschaufel 456
- Einlassventil 468
- einphasiger Werkstoff 224, 232
- Einsatzhärten 257, 261, 263, 267, 273 f., 362
- Einsatzhärtungstiefe 261
- Einsatzstahl 261, 403, 406
- Einschluss 36, 360, 438
 - , gröberer 36
 - , nichtmetallischer 36 f., 99, 424
- Eisen 345
- Eisenphosphat 221
- Eisenschwamm 29 f., 37, 39
- E-Kupfer 511
- Elastomer 297, 310, 561
- Elastomer-Dichtung 422
- elektrische Leitung 505
- elektrischer Leiter 511
- Elektrode 141
- Elektrodeotyp, basischer (B) 143
 - , Rutil- (R) 143
 - , saurer (A) 143
- Elektrodenumhüllung 142
- Elektrolyt 202–205
- Elektrolytzusatz 319
- Elektromigration 535
- Elektronenleitung 507
- Elektronenstrahl 151, 260
- Elektronenstrahlschweißen 151–154
- Elektronik 505
- Elektroofen 40
- Elektrophorese 219
- Elektroschlackeschweißen 146 f.
- Elektroschlackeumschmelzen 44
- Elektrostahl 39
- elektrostatische Aufladung 563
- elektrostatisches Spritzen 219 f.
- Elektrostriktion 583
- Eloxieren 223
- Emaillieren 223
- E-Modul 111, 408
 - , spezifischer 366
- endformnahe Fertigung 276, 387
- Endogas 188, 228 f., 266
- endogen 95
- Endzone 88
- Energieband 506
- Energieniveau 506
- Energietechnik 505
 - , elektrische 505
- Energieträger, erneuerbare 484
- EN-GJL 407
- EN-GJM 409
- EN-GJN 410
- EN-GJS 408
- EN-GJV 409
- Entfärben 73
- Entfestigung 111
- Entgasen 41, 43, 89
- Entglasung 75
- Entkohlen 36, 228, 333
- Entkohlungstiefe 116
- Entphosphorung 38
- entropie-elastisch 300
- Entschwefelung 32 f., 37, 41 f.
- Entspannen 242, 264
- Entzinkung 501
- EP 303, 306, 562
- EP-Additiv 364
- EP-Harz, C-faserverstärkt 459
- Epitaxie 530
- E-Porzellan 559
- Epoxidharz 61, 195, 303, 306, 394, 562
- Epoxidharz-Klebstoff 195
- Epoxidharzlack 345 f.
- ϵ -Carbid 242
- Erholung 165
- ermüdungskritisch 385
- Ermüdung 374
- Ermüdungsbruch 385
- Ermüdungsriß 258, 375
- Ermüdungsverschleiß 358, 360, 362
- erneuerbare Energieträger 484
- Erodieren 135 f.
- Erschöpfungsbereich 525
- Erstarrung 85, 95
 - , gelenkte 86 f., 99
 - , unberuhigte 42
- Erstarrungsintervall 89
- Erstarrungslenkung 412
- Erstarrungsmorphologie 95 f.
- Erz 17

- Erzlaugung 22
 ES 146
 ESU 44 f.
 Eutektikum 31
 eutektisch 185
 eutektische Legierung 97
 eutektisches System 352
 Excimer-Gaslaser 155 f.
 Exogas 188, 228 f.
 exogen 95
 Extruder 291 f.
 Extrudieren 291, 293, 310, 323
 Extrusionsschweißen 313
- F**
- Fahrwerk 446, 448 f., 470
 fail safe 367, 386
 Fan 449
 Faser 302, 389
 –, Al₂O₃- 396
 –, angeschnittene 112
 –, B- 396
 –, Bor- 396
 –, C- 392 ff.
 –, HM- 392
 –, HT- 392
 –, IM- 392
 –, SiC- 396
 Fasergewebe 306
 Faserspritzen 307 f.
 Faserstruktur 111
 Faserverstärkung 389, 396
 FeCo-Legierung 574
 Federstahl 250, 413
 Federwerkstoff 413
 Fehler 375
 Fehlerbewertung 169
 Fehlerecho 382
 Fehlerprüfung 375
 Feingießen 455
 Feinguss 83, 276
 feinkeramisch 318
 Feinkorn 34
 Feinkornbaustahl, hochfester, schweißbarer
 476, 479
 Feinkorncharakter 171
 Feinkornqualität 164
 Feinkornstahl 263 f., 478 f.
 –, perlitarm 479
 –, perlitfreier 479
 Feinlunker 88 f.
 Feinperlitisieren 473
 Feinstkornhartmetall 431
 Feinwanderung 513
 Feldeffektr transistor, unipolarer 544
 Feldspat 64 f.
 FeNi-Werkstoff 574
 Fe-reicher Werkstoff 573
 Fernfeld 380
 ferrimagnetisch 565, 568
 Ferrit 66, 568, 575
 –, δ- 177
 –, hartmagnetischer 576
 –, hexagonaler 576
 –, weichmagnetischer 575
 ferritischer Stahl 175, 492 f.
 Ferroelektrika 583 f.
 Ferroelektrizität 552, 579, 581
 Ferrolegerung 24
 ferromagnetisch 565
 Fertigung, additive 280
 –, endformnahe 276, 387
 Fertigungstechnik 384
 Fertigungsverfahren, Kriterien 76
 FeSi-Blech 574
 festes Kohlungsmittel 267
 Festigkeit 111, 404, 413 f., 477
 –, spezifische 366, 402
 Festigkeitskennwert, bruchmechanischer
 366
 Festigkeitsnachweis, dynamischer 368
 –, statischer 368
 Festigkeitssteigerung 302
 Festkörper-Laser 156
 Festkörperreibung 363
 Festphasensintern 325
 Festwalzen 114
 FET 544
 Feuerverzinken 201 f.
 Filament 391
 Filmkühlung 451
 Filter 101
 Fischauge 168
 Flächenpressung 257 f.
 Flachglas 329

- Flammenhärten 259 ff., 273
Flammen-Randschichthärten 257
Flammschutzmittel 63
Flammspritzen 208
Flash-Speicher 538
Fließvermögen 96
Fließfigur 123 f.
Fließkriterium 120
Fließkurve 120, 124
Fließpressen 77, 118, 276
Fließspan 125 f., 130
Flipchip 538
Flipchip-Kontaktierung 536
Floatglas 329
Flockenriss 34
Flotation 18, 47, 51
Flugzeugzelle 436, 444
Flüssigkeitsreibung 363, 415
Flussmittel 20, 64 f., 139, 184 f., 187 f.,
201, 321
Folie 300, 302
Form, verlorene 82
Formänderungsfestigkeit 120
Formänderungsvermögen 113, 120
Formänderungswiderstand 112
Formanisotropie 571
Formbarkeit 422
Formeinrichtung 78
Formfüllungsvermögen 96
formgebunden 306, 317
Formleichtbau 384 f.
Formmaskenguss 82
Formmasse 304, 306, 318 f., 395
Formpressen 323
Formteil 293
Forsterit 560
Forsterit-Keramik 560
foto-oxidativ 193
Freifläche 125, 128, 428
Freiformschmieden 116
Freiwinkel 125
Fremdkeim 98
Fremdstoffeinbau 203
Fressen, der Gleitpartner 364
Frischen 21, 38
Fritte 223
Fügen 76, 138
Füllmittel 63
Füllstoff 290, 304 f.
funktionelle Gruppe 55
Funktionswerkstoff 505
- ## G
- Galliumarsenid (GaAs) 525 f.
Galvanikbeschichtung, von Kunststoffen
315
galvanisches Beschichten 34, 100
Galvanisieren 77, 199, 202 f., 315
galvanisiergerechte Gestaltung 204
Galvanoformen 100, 203
 γ' -Phase 454 f.
 γ -Strahlen 377, 379
Gangart 17
Gasauflöhen 264
Gasdichtigkeit 459
Gaslaser 156
Gaslöslichkeit 88
Gaslunker 89
Gasnitrieren 271, 406
Gasnitrocarburieren 272
Gasphasen-Diffusionsdotierung 534
Gasphasen-Synthese 67
Gasporosität 88 f.
Gasschweißen 157
Gasturbine 449, 454
gebrochenes Härten 247
Gefüge 164
–, bainitisches 171
–, martensitisches 171
–, nanokristallines 106
Gefügeanisotropie 332
Gefügeverfeinerung 239
Gefügezeile 332
Gefügezeitigkeit 111, 132, 168
Gehäusewerkstoff 422
Gelcoat 307
gelenkte Erstarrung 87, 99
Gelzustand 290
Gemengeansatz 72
Genauschmiedetechnik 117
gerichtet 456
Gesensschmieden 77, 116
Gestaltung, galvanisiergerechte 204
–, klebgerechte 191 f.
Gestaltungsproblem 384
Gestein 65

- Getriebezahnrad 407
 Gewichtsminimierung 365
 Gewindewalzen 114
 Gießschweißen 158
 Gießbarkeit 96 f., 465
 Gießen 76, 78
 –, Kunststoffe 290
 Gießform 78 ff.
 Gießharz 303
 Gießverfahren 76
 Glanzchromschicht, mikrorissige 207
 Glanzchromschichten 343
 Glanzverchromen 205 ff.
 GLARE 398, 446
 Glas 559
 –, E- 392
 –, kurzes, langes 328
 –, metallisches 574
 –, optisches 72
 –, R- 392
 –, S- 392
 Glas-Aluminium-Reinforced GLARE 398
 Glasbruch 73
 Glasfaser 329, 391, 441
 Glasfehler 75
 Glasgemenge 72 f.
 Glashärte 242
 Glasherstellung 72
 Glasieren 322
 Glaskeramik 398
 Glaskohlenstoff 71
 Glasphase 321
 Glasschmelze 73
 Glastemperatur 327
 Glasurbrand 322
 Glasurschlicker 322
 Glattwalzen 114
 Gleichgewicht 252
 Gleichgewichtszustand 224
 Gleichstromschweißen 144
 Gleitlager 358, 415, 417 ff.
 Gleitlagerlegierung, Al- 418
 Gleitlagerwerkstoff 415 f., 419, 421
 Gleitmittel 63, 104
 Gleitringdichtung, keramische 423
 Glimmer 64 f., 559
 globulitische Kristallausbildung 93
 GMT 395
 Gneis 65
 Goss-Textur 571
 GP-Zone 235
 Granit 65
 Granulat 63
 Graphit 68 f., 71, 345, 364
 Graphitfaser 70
 Graphitieren 70
 Grauguss, mit Kugelgraphit 408
 – mit Lamellengraphit 407 f.
 – mit Vermiculargraphit 409
 Greifbedingung 114
 Grenzziehverhältnis 120
 grobkeramisch 318
 Grobkorn 332
 Grobkornglühen 131
 grobkörnig 456
 grobkörniges Gefüge 174
 Grobwanderung 513
 Grübchen 358
 Grundierung 218, 347
 Grünfestigkeit 80, 109, 318
 Grünsandform 80
 Gruppe, funktionelle 55
 GS 411
 Gusseisen 26, 29, 95, 98, 178 f., 403, 407
 –, austenitisches 495
 –, Korrosionsverhalten 492
 –, Schweißen 178 f.
 –, Sorten 407
 Gussfehler 85, 99
 Gussgefüge 97, 99
 Gussstruktur 26
 Gusstextur 332
 Gusswerkstoff 26
 Güterwert, von Dauermagneten 576
- ## H
- Haftung 199
 Haftvermittler 191, 198, 330
 Halbleiter 508, 522–525, 527, 536, 539
 –, Eigen- 522
 –, Sperrschicht- 539
 –, Störstellen- 522
 –, Verbindungs- 522
 –, Volumen- 539
 –, Werkstoffe 525
 Halbleiterbauelement 540

- Halbleitereinkristall 527
- Halbleiterwiderstand 539
- Halbwarmumformen 112 f., 124
- Halbwarmverformung 114
- Halbzeug 26, 114, 117, 291
- Hämatit 27, 351
- Handlaminiere 307 f.
- Harnstoffharz 304
- Härtbarkeit 171, 240, 244, 248
- Hartbearbeitung 134
- Hartchrom 342
- Härte 357, 360
- Härten 31, 77, 239–246
 - , chemisches, von Glas 331
 - , gebrochenes 247
 - , thermisches, von Glas 331
 - , Warmbad- 227, 247, 264
- Härter 195
- Härteriss 246, 375
- Härterissbildung 246
- Härt schrumpfung 305
- Härtspannung 245 f.
- Härteverzug 246
- Hartguss 410
- Hartlöten 186 ff.
- hartmagnetisch 570, 576
- Hartmetall 216, 428 ff.
- Hartschaum 299
- Hartstoffbeschichtung 362, 430
- Hartstoffschicht 212
- Härtung, lokalisierte 260
- Hartverchromen 203, 205, 207
- Hartzerspannung 431
- Hartzink 202
- Harzanteil 305
- Hauptstrom 449
- Heißpressen, isostatisches 324
- Heißbrüchigkeit 32
- Heißgaskorrosion 348, 351, 353
- Heißgesenkschmieden 117
- heißhärtend 195
- heißisostatisches Pressen, kapselloses 325
- Heißkleber 194
- Heißleiter 541
- Heißpressen 108, 324, 429, 431
 - , isostatisches 108, 277
- Heißriss 32 f.
- Heißspritzen 219
- Heizelementschweißen 313
- Heizwiderstand 516
- Helium 147
- heterogene Keimbildung 98
- High Purity HP 400
- high solids 219
- Hilfsmittel 217
- H-induzierte Rissbildung 34, 36, 168, 174
- HIP 108, 277, 324
- HIP-Behandlung 277, 279
- hitzebeständiger Werkstoff 349
- HM-Faser 70, 392
- hoch angelassener Vergütungsstahl 447
- Hochdruckwasserstrahl 137
- Hochenergie-Impuls-Magnetron-Sputtern
 - HIPMS 212, 215
- hochfester Konstruktionsstahl 250
- hochfester Stahl 35, 205
- hochfester Werkstoff 229
- Hochfrequenzschweißen 313 f.
- Hochfrequenztechnik 554
- Hochgeschwindigkeitsflammspritzen 209
- Hochgeschwindigkeitsfräsen 436
- Hochgeschwindigkeitsumformen 124
- Hochgeschwindigkeitszerspanen 134, 431
- hochlegierter Stahl 174
- Hochleistungswerkstoff 276
- Hochleistungszersäuben 214
- Hochofen 26 f.
- Hochspannungstechnik 554
- Höchst druckspritzen 219
- höchstfester Stahl 388, 446, 448
- Hochtemperaturaufkohlung 266
- Hochtemperaturkorrosion 348
- Hochtemperaturlot 187
- Hochtemperatur-Supraleiter 520
- Hochtemperaturwerkstoff 353
- Hochvakuum 154
- Hohlkörper 300
- Hohlkörperblasen 301, 328
- Homogenglühen 91, 231
- Homogenisierung 74
- Honen 127
- HP 324
- HP-Legierung 400
- HSC 134
- HT-Faser 70, 392
- HTSL 520

H-Versprödung 172
 HVOF-Verfahren 209
 Hydrometallurgie 17, 22
 Hystereseschleife 569, 582
 Hystereseverlust 572

I

IC 536
 IHU 283
 IM-Faser 70, 392
 Impfen 98
 Impuls-Echo-Verfahren 381 f.
 Inchromieren 211
 Induktionshärten 259 ff., 273, 406
 induktives Randschichthärten 257, 259
 Industriegasturbine 489
 Inertgas 147 f.
 Inertgasatmosphäre 228
 Inertgasspülen 43
 Infiltrieren 110
 Inhibitor 59, 200, 338 f.
 Innenhochdruck-Umformen 276, 283
 Innenkühlung 451
 innere Oxidation 237
 in-situ-Polymerisation 291
 instabile Wachstumsfront 92
 in statu nascendi 34
 Integralbauteil 117, 440
 Integralbauweise 386 f.
 Integralschaum 298 f.
 integrierter Schaltkreis 536
 Interaktion 244
 interkristalline Korrosion 166, 176 f., 375, 494
 intermetallische Phase 185
 intermetallische Verbindung 453
 Invarstahl 395
 Ionenätzen 213
 Ionenimplantation 212, 214 f., 217, 330, 534
 Ionen-Implantationsdotierung 534
 ionische Polymerisation 58 f.
 Isolator 508, 555
 Isolierstoff 558
 isostatisches Heißpressen HIP 108, 277, 324
 isostatisches Pressen 106, 108, 324
 Isotherm-Umwandeln in der Perlitstufe 131

Isothermschmieden 117, 276, 458
 isotrop 287

J

Jominy, Stirnabschreckversuch 248
 Jominy-Probe 248

K

Kalandrieren 297, 310
 Kalk 64
 Kalk-Natron-Glas 73
 Kaltarbeitsstahl 425
 Kaltaushärten 198, 235
 Kaltgasspritzen 209
 kalthärtend 195
 Kaltkammerverfahren 84
 Kaltleiter 541
 Kaltpressschweien 139, 163
 Kaltriss 168
 Kaltschweien 179
 Kaltsetzen 413
 Kaltumformen 111 f., 114, 123 f., 254
 Kaltzähigkeit 489 f.
 Kaolin 65
 Kaolinit 65
 Katalysator 55, 57
 –, Ziegler-Natta- 60
 kataphoretische Beschichtung 219
 Kathode 202 f.
 Kathodenzerstäuben 212 ff.
 kathodische Spannungsrisskorrosion 35
 kathodisches Reinigen 34
 Kautschuksorten, synthetische 310
 Keimbildner 63, 98
 Keimbildung 98
 –, heterogene 98
 Keimdichte 97
 Keimzustand 97
 Keramik 360
 –, Al₂O₃- 560
 –, AlN- 560
 –, BeO- 560
 –, PZT- 584
 –, schwarze 431
 –, weiße 431
 Keramiklager 415
 Keramikventil 468

- keramische Gleitringdichtung 423
keramische Verstärkungsfasern 397
keramischer Lagerwerkstoff 422
Kerbe 259 f., 367
Kerbschlagzähigkeit 31
kerbwirkungsbedingte 385
Kern 79 f.
Kernfestigkeit 258, 261
Kesselspeisewasser 339
Kleben 189, 191, 193 ff., 197 f., 327
– von Kunststoffen 314
Klebflächenaktivierung 315
klebgerecht 189
klebgerechte Gestaltung 191 f.
Klebstoff 189
–, Acrylat- 196
–, Acrylharz- 195 f.
–, anaerober 196
–, Cyanacrylsäure- 197
–, Epoxidharz- 195
– für erhöhte Temperaturen 197
–, Phenolharz- 195
–, Polyurethan- 195 f.
Knetwerkstoff 26
Koagulation 166, 235
Koerzitivfeldstärke 569 f., 576, 582
Kohäsion 189
Kohlenstoff 20, 68 f., 241
–, amorpher 72
–, C-Faser verstärkter CFC 399
Kohlenstoffäquivalent C_E 171 ff.
Kohlenstofffaser 69 f., 309
Kohlenstoffpegel 265
Kohlungsmittel, festes 267
Kokille 25, 84
Kokillenguss 79, 83 f.
Koks 69
Kolben 465
Kolk Kennzahl 128
kolloid 105
Kolophonium 184, 187
Kondensator 554
Kondensatorkeramik 580
Kondensatorwerkstoff 579
Konfektionieren 63
Konstantan 516
konstitutionelle Unterkühlung 92, 95
Konstruktionstechnik 384
Konstruktionswerkstoff 505
Kontaktkorrosion 190, 335 f., 340 f., 400
– an Lötverbindungen 341
– an Schweißverbindungen 341
Kontaktwerkstoff 512, 514
Kontaktwiderstand 512
kontrolliertes Walzen 255
Konverter 37
kornfeinender Zusatz 178
Kornfeinung 98, 237, 239, 255, 264, 490
Kornfeinungseffekt 255
Kornform 99
Korngrenze 166, 175
Korngrenzenausscheidung 336
Kornrenzgleiten 284
Korngröße 244
Kornseigerung 91
Kornvergrößerung 140, 164 f., 171, 174, 177 f., 234
Kornwachstum 325
Korrosion 202
–, interkristalline 166, 176 f., 375, 494
–, Lochfraß- 494
–, Niedertemperatur- 354 f.
–, Spalt- 494
–, Spannungsriss- 375, 494
–, Taupunkt- 354
– von Eisenwerkstoffen 490
– von Gusseisen 492
korrosionsbeständiger Stahl 175, 492
korrosionsbeständiger Werkstoff 490
–, Wahl 336
Korrosionsbeständigkeit 273
Korrosionselektrolyt 352
Korrosionselement 341
Korrosionsschutz 199, 202, 335, 490, 492
–, aktiver 335 f.
–, anodischer 338
–, Anstrich 346 f.
–, kathodischer 336 f., 341
–, passiver 335, 341
Korrosionsschwachstelle 339
Krafteinleitung 442
Kriechen 193, 451, 487
Kriechstromfestigkeit 555, 557
Kristallanisotropie 332, 571
Kristallausbildung, globulitische 93
–, stängelige 93

- Kristallseigerung 91, 231
 Kristallwachstum, stängeliges 164
 kritische Abkühlungsgeschwindigkeit 171, 234, 240
 Kroll-Prozess 53 f.
 Kryolith 23, 46
 kubisches Bornitrid, polykristallines 432
 Kugelstrahlen 413
 Kühlmedium 226
 Kühlschmiermittel 133
 Kühlung 449
 –, Effusions- 450
 –, Film- 450
 Kühlwasser 339
 Kunststoff 419 f.
 Kunststoffflager 420
 Kunststoffschaum 298
 Kupfer 47, 181, 416, 511
 –, elektrische Leitfähigkeit 511
 Kupferherstellung 48 ff.
 Kupferkies 47
 Kupferlegierung, Korrosionsverhalten 500
 Kupferlot 187
 Kupferstein 48
 Kupfer-Werkstoff, Schweißen 181
 Kurbelgehäuse 467
 Kurbelwelle 466
 Kurbelwellenlager 466
 kurzes Glas 328
 Kurzfaser, Matten 395
- L**
- Lackanstrich 438
 Lackieren 217, 315
 –, von Kunststoffen 315
 Lager 414, 466
 –, wartungsfreies 101
 Lagerschale 415
 Lagerwerkstoff 415
 –, keramischer 422
 lamellares Gefüge 166
 Lamellenriss 168, 481
 Laminieren 306
 Laminierharz 394
 langes Glas 328
 Längsfehler 376
 Läppen 127
 Laser, CO₂-Gas- 155 f.
 –, Excimer-Gas- 155 f.
 –, Festkörper- 156
 –, Gas- 156
 –, Nd:YAG- 155 ff.
 Laserdiode 157, 548
 lasergestütztes MIG-Schweißen 157
 Laser-Hybridschweißen 157
 Laserschneiden 137, 482
 Laserschweißen 157, 387, 440, 446, 482
 – von Al-Werkstoffen 157
 – von Stahl 157
 Laserstrahl 137, 155, 260
 Laserstrahlschweißen 151, 154 f.
 Lastamplitude, Reihenfolge 370
 Laufbuchse 467
 Laufrad 473
 Läuterphase 72
 Läuterung 74
 LD-Prozess 38
 lebendes Polymer 59
 LED 549
 LED-Diode 548
 ledeburitisch 424
 Legieren 24 f.
 –, mechanisches 66, 104 ff.
 legierter Stahl 243 f.
 Legierung 185
 –, Al- 436, 459
 –, Al-Li- 439, 459
 –, Co- 454, 457
 –, CuPb- 417
 –, CuPbSn- 417
 –, CuSn- 417
 –, CuZn- 122, 131
 –, eutektische 97
 –, FeCo- 574
 –, MgLi- 440
 –, Nah- α - 452
 –, Ni- 452, 454–457
 –, ODS- 105, 453
 –, Pb- 417
 –, Si_{1-x}Ge_x 526
 –, Sn- 417
 –, Ti- 131, 449, 452
 –, untereutektische 278
 Legierungsbildung 201

Legierungselement 171, 243, 250, 405
–, carbidbildendes 424
Leichtbau 276, 365–368, 384, 482
Leichtbauwerkstoff 388
Leichtmetall 388
Leistungselektronik 546
Leiterwerkstoff 511
Leitfähigkeit, elektrische 506, 511
Leitlegierung 512
Leitungsband 507
Lichtbogen, Schmelzschweißverfahren 140
Lichtbogenhandschweißen 141 f., 144, 150
Lichtbogenpulsen 149
Lichtbogenspritzen 208
Lichtleitfaser 330
Lithium 439
Lithografie 532 f.
Lochfraßkorrosion 494, 503
lokalisierte Härtung 260
Longitudinalwelle 379 f.
Lösungsglühen 175, 233
Lot 188
Lötbarkeit 188
Lötbrüchigkeit 188
Löten 184 f., 331
Lotwerkstoff 184 f.
L-Richtung 436
LT-Richtung 436
Luminiszenzdiode 548
Lunker 25 f., 78, 85 ff., 96, 412

M

Magnesium 54, 336, 400
–, Herstellung 54
Magnesium-Werkstoff, Schweißen 183
Magnet, Alnico- 577 f.
–, NdFeB- 577
–, SmCo- 577
Magnetform 81
Magnetinduktions-(Wirbelstrom-)Prüfung 383
magnetische Anisotropie 571
magnetische Sättigung 569
Magnetisierung 568
Magnetisierungsverlust 570
Magnetismus 564
Magnetit 27, 223, 351, 568
Magnetostriktion 569

Magnetpulverprüfung 376
Magnetpulverteilchen 578
Magnetron 214
Mahlen 102, 105
Mangan 37
Manganhartstahl 361
Manganin 516
Manganphosphatschicht 221 f.
Mangansulfid MnS 32, 132
maraging steels 447
Martensit 332
martensitaushärtender Stahl 446 ff.
Martensitbildung 239
Martensithärte 241
martensitisch 414, 424
martensitischer Stahl 174, 493
martensitisches Gefüge 171
Martensitstarttemperatur 175
Maschinenbauwerkstoffe 403
Maskieren 533
Massenglas 73
Massenteil 101
Massivumformung 118
Mastikation 310
Materialien, nichtmetallische 444
Matrixharz, thermoplastisch 395
Matrixkomponente 388
Matrize 118, 291
Matte 21, 395
MCrAlY-Schutzschicht 353 f.
mechanisch legiert 102
mechanisches Legieren 66, 104 ff.
Mehrphasenstahl 463 f.
mehrphasiger Werkstoff 224, 232
Melaminharz 304
Messerlinienkorrosion 177
Metal Injection Moulding 277
Metall, hdp 122
–, kfz 122
–, krz 122
Metallabscheiden, stromloses 206
Metall-Aktiv-Gas-Schweißen (MAG) 147, 149 f.
Metallformspritzen 277
Metall-Inert-Gas-Schweißen (MIG) 147, 149
metallischer Überzug 341
metallisches Glas 574

- Metallisierung 315, 326, 534
 –, von Kunststoffen 315
 Metallschaum 443
 Metallschmelze 227
 metallurgische Verträglichkeit verschieden-
 artiger Metalle 183
 MF 304
 M_f -Temperatur 240
 Mg-Legierung 401
 MgLi-Legierung 440
 Mikroelektronik 537
 Mikrolegieren 477
 mikrolegierter Stahl 255, 463
 Mikrolunker 86, 88
 Mikroschweißen 151 f.
 Mikroverkapselung 198
 MIM 277
 Mischkristall, übersättigter 166
 Mischoxid 66
 Mischreibung 363, 415
 Mischungsregel 390
 Mizelle 56
 MMC 389, 395 f.
 MnS-Einschlüsse 32 f.
 MnS-Gehalt 168
 Modell 79
 –, verlorenes 82
 Modul 537
 Molekülabbau 287, 333
 Molekülorientierung 332
 Möller 27
 Molybdändisulfid 364
 Monogas 228
 Monomer 55
 Monomerguss 291
 MOS-FET-Transistor 545
 Motor 465, 467
 M_s -Temperatur 240, 242, 263
 Mullit 321
- N**
- Nachbehandlung, thermische 316
 Nachbrenner 449
 Nachdruck 289, 295
 Nachfahrversuch 370
 Nachhärtung 317
 Nachkristallisation 289, 317
 Nah- α -Legierung 452
 Nahfeld 380
 nanokristalliner Werkstoff 102, 105 f.
 Nanopulver 67
 Nassguss 80
 Natrium 352
 Naturdiamant, einkristalliner 432
 Naturkautschuk 310
 Nd:YAG-Laser 155 ff.
 Near net shape forming 276
 Nebenstrom 449
 Netzwerk 55
 Netzwerkstruktur 289
 Netzwerkwandler 73
 Ni-Basislegierung 488
 –, warmfeste 483
 Nichrome 516
 nichtmetallischer Einschluss 36 f., 99
 nichtmetallisches Material 444
 Nichtoxidkeramik 66
 Nickel 50, 181, 205 f., 490
 –, Korrosionsverhalten 502
 Nickelaluminid 456
 Nickelherstellung 51 f.
 Nickellegierung, Korrosionsverhalten 502
 Nickelschicht 343
 Niederdruckverfahren 308, 412
 Niederhalter 120
 Niedertemperatur-Korrosion 354 f.
 niedrig angelassener Vergütungsstahl 447
 niedriglegierter Stahl 349
 Ni-Legierung 452, 454–457
 Niob 124, 255, 477
 Niob/Tantal 176
 Ni-P-Schicht 206
 Nitrid 66, 257, 268, 270
 –, α'' - 268
 –, γ' - 268
 Nitrieren 257, 268 f., 271–274, 362
 Nitrierstahl 269, 271, 406
 Nitriertemperatur 269, 272
 Nitrocarburieren 257, 269, 271 f., 274
 n-Leitung 523
 Nockenwelle 468
 Nomex 443
 Normalglühen 174, 237 ff., 412, 490
 Normalisieren 237
 Normen 585
 Notlaufverhalten 415

NTC 515

NTC-Widerstand 541

Nukleierungsmittel 63

Nutzfahrzeug 472

O

obere Bainitstufe 252

Oberfläche 199 f.

Oberflächenbehandlung 346

Oberflächenqualität 130

Oberflächenrauigkeit 191

Oberflächenreinigung 199 f.

Oberflächenriss 246

Oberflächenvorbehandlung 191, 197, 199 f.

Oberflächenwiderstand 555

Oberflächenzerrüttung 358

OBM-Prozess 39

ODS-Legierung 105, 453

Ofenatmosphäre 227

Ofenhartlöten 188

Offshore-Anlage 485

Öl, synthetisches 364

Ölanstrich 218

Opferanode 336 f., 438

optische Verzerrung 75

optisches Glas 72

optoelektronisches Bauelement 547

Orangenhaut 123

Orientierung 287, 302, 305, 317

Oxid, basisches 20

–, saures 20

Oxidation 333

–, innere 237

– von Legierungselementen 228

Oxidfilm 348 f.

Oxidkeramik 66, 431 f.

Oxidschicht 139, 222

P

PA 291, 420

Paarbildung 522

Palmgren-Miner-Regel 370 ff.

PAN 70, 392

Panzern 362

paramagnetisch 565

Partikelorientierung 332

Partikelverstärkung 396

Passivierung 336, 492, 494, 502

Patina 500

Pauli-Prinzip 506

Pb-Legierung 417

PE 562

PECVD 217

Pelletieren 18

Peltier-Effekt 510 f.

Pendelglühung 254

Permeabilität 569

Permittivitätszahl 553, 558, 580

Perowskite 551

Peroxid 58

PF 304, 562

Pfannenmetallurgie 30, 41, 43

Pfropfcopolymer 59

Phasenwinkel 554

Phenolharz 195, 304

Phenolharz-Klebstoff 195

Phosphatieren 113, 199, 221, 346

Phosphatschicht 222

Phosphor 27, 31, 38, 143, 171, 177, 463

Photodiode 547

Phototransistor 547

Photovoltaik 486, 549

Photowiderstand 547

piezoelektrischer Schwinger 380

Piezoelektrizität 579, 583

Pigment 198, 217, 344 f.

Pinch-Effekt 142

Pitting 358

PKD 432 f.

Planartechnik 532

Plasma 141

Plasma Enhanced CVD 217

Plasmaätzen 213

Plasmanitrieren 272

Plasmaschneiden 137

Plasmaschweißen 151

Plasmaspritzen 208

Plasmastrahl 137

plasmaunterstützt 199

Plastifizierung 288, 292

Plastizität 65, 111

Plattensteifigkeit 385

Plattierung 209, 342, 438

p-Leitung 524

Pleuel 466

PMC 309, 389, 391, 395, 459

- PMMA 291
pn-Übergang 532, 539, 543
Polarisation 552
–, Dipol- 552
–, Elektronen- 552
–, Ionen- 552
Polen 50
Polierbarkeit 36
Polieren 127
Polyacrylnitril 70
Polyacrylnitrilfaser 392
Polyaddition 61, 195
Polyamid 61, 291
Polybenzimidazol 197
Polyester 61, 303
Polyesterharz 394
–, ungesättigt 306
Polyethylen 562
–, hochmolekulares 298
–, vernetzt, VPE 562
Polyimid 197, 298
Polykondensat 292
Polykondensation 60 f., 195
polykristallines Si 545
Polymer 55
–, lebendes 59
Polymerisation 57–60, 196
Polymer-Pyrolyse 67
Polymerverbundwerkstoff 388
Polymethylmethacrylat 291
Polyreaktion 55 ff.
Polysiloxan 67
Polystyrol 298, 562
Polytetrafluorethylen 298, 364, 562
Polyurethan 61, 298, 346
Polyurethan-Klebstoff 195 f.
Polyurethanlack 345
Polyvinylchlorid 561
Pore 26, 80, 85, 88 f., 110, 167, 182, 270, 272
Porenbildung 96
Porensaum 270, 273
Porenvolumen 320
Porosität 110
Porzellan, E- 559
Präzisionsschmiedetechnik 117
Präzisionsschweißung 154
Präzisionsteil 296
Präzisionswiderstand 516
Precursor 67
Prepreg-Material 307
Prepreg-Pressen 309 f.
Presseffekt 118
Pressen 101, 114, 304, 323
–, dreiachsiges 106
–, einachsiges 106
–, heißisostatisches 325
–, isostatisches 106, 108, 324
Pressmasse 304 ff., 318
Pressschweißung 139
Pressschweißverfahren 141, 159
Pressverfahren 308, 310
Primärmullit 321
Primer 197 f.
Profilziehen 309 f.
Prozess, Kroll- 53 f.
–, LD- 38
–, OBM- 39
PTC 515
PTC-Widerstand 541
PTFE 420
pulse plating 206
Pultrusion 309
Pulver, Aufbereitung 104
–, legiertes 104
–, nanokristallines 104, 106
–, Pressen 107
Pulverbrennschneiden 137
Pulverherstellung 102 ff.
Pulverlack 219 f.
Pulvermetallurgie 76 f., 101 f., 431
pulvermetallurgisch 458
Pulverpressen 107
Pulverschmieden 276, 282
Pulverschweißen 150
Pulververdichtung 106
Punktschweißen 159
PUR-Schaum 300
Putzen 79, 81, 87
PVC 561
PVC-Masse 297
PVD-Beschichten 199
PVD-Verfahren 67 f., 212, 353
Pyroelektrizität 579, 583 f.
Pyrokohlenstoff 69, 71
Pyrolyse 67, 70

Pyrometallurgie 17, 19
PZT-Keramik 380

Q

Quarz 64 f., 72 f., 321
Quarzsand 80
Quellung 65
Querfehler 376
Querrichtung 112

R

Rad 473
Radikal 58
Raffination 17, 22 f.
Rain-flow-Zählverfahren 370
Random-Versuch 371
Randoxidation 266, 333
Randschicht 261
Randschichtdicke 258
Randschichthärte 258
Randschichthärten 260, 406
–, Flammen- 257
–, induktives 257, 259
Randschichtumschmelzen 211
Randschichtverfestigung 256 f.
Rapid Prototyping 280
Rapid Solidification 104
Reaction Injection Moulding 300
Reaktionsklebstoff 194 f.
Reaktionssintern 66, 326
Reaktions-Spritzgießen 300
Reduktion 27 ff.
Reduktionsmittel 20
Redundanz 367
Regenerativkühlung 460
Reibkorrosion 359
Reibrührschweißen 161 f., 387, 440
Reibschweißen 161, 313
Reibung 112 f., 355
Reifen 310
Reinstaluminium 47
Reißlänge 366
Reißrippe 412
Reißspan 125 f.
Rekombination 523
Rekristallisation 26, 165
Rekristallisationsglühen 232
Relaxation 451

Remanenz 569, 582
Reservebereich 524
Restaustenit 240 ff., 245
Restfestigkeit 367, 372–375
Restlebensdauer 367, 373 ff.
Restquarz 321
Retardation 451
R-Glas 392
Richtung, L- 436
–, ST- 436
RIM-Verfahren 300
Riss 167, 375, 377
Rissausbreitung 373
–, stabile 373
Rissbildung 333
–, H-induzierte 34, 36, 168, 174
Risssschließeffekt 372
Rissstopper 481
Risszähigkeit 194, 360, 458
Roheisen 26, 29, 31, 37, 39
Rohmetall 17
Rohrherstellung 115
Rollennahtschweißen 159
Röntgenprüfung 377 f., 383
Rost 491
Rösten 19, 48, 53
rostträger Stahl 491
Rotbrüchigkeit 31
Roving 306, 391
RSG 300
Rückknäulen 287
Rückkohlung 39
Ruß 69
Rußabscheidung 265 f.
Rutil-(R) Elektrodeotyp 143

S

safe life 366 f., 449
Salzbad 229, 267, 271 f.
Salzbadnitrieren 272
Salzschmelze 227, 229, 267
Sand 200
Sandguss 79, 81
Sandwichkonstruktion 443
Sandwichstruktur 387
Sättigung 569, 582
Sauerstoff 33, 38, 44 f.
Sauerstoffaffinität 17

- Sauerstoffkernlanze 137
Sauerstoffpulverlanze 137
Säurebeizen 34
saurer (A) Elektrodentyp 143
Scandium 440
Schadensakkumulation, lineare 371
Schadensakkumulations-Hypothese 373
Schadenstoleranz 367, 394, 396
Schäftung 193
Schalenhartguss 411
Schalldruck 380
Schallfeld 380
Schaltkreis, integrierter 536
Schälwirkung 192
Schamotte 80
Schäumen 298 f.
–, Kunststoff 298
Schaumstoff 299
Scherspan 125 f.
Scherzone 125
Schichthaftung 199
Schichtwiderstand 517
Schiene 472
Schiffbaustahl 480 f.
Schlacke 19 f., 36, 140–143, 145
–, basische 31, 37 f.
schlackenarm 414
Schlackeneinschluss 166
Schlauchpore 167
Schleifen 127
Schleifmittel 434 f.
Schleuderguss 78, 85
Schlichte 84, 329, 391 f.
Schlicker 318
Schlickergießen 319, 323
Schlieren 75
Schlupf 261
Schmelzbruch 293
Schmelze, beruhigte 41 f., 78
–, Verdüsen 102
schmelzelektrolytisch 17
Schmelzflusselektrolyse 23
Schmelzkleber 194
Schmelzschneiden 136
Schmelzschweißen 139, 141
Schmelztauchen 201
Schmiedefaser 36, 99, 111
Schmieden 26, 114, 116
Schmiedestück, großes 34, 41, 44
Schmieren, Kunststoffe 363
Schmierstoff 112 f., 222, 363 f.
Schmierung 355
Schneidkeramik 431
–, nichtoxidische 432
–, oxidische 431
Schneidstoff 133, 427 f.
–, superharter 432
Schneidwerkzeug, Versagen 127
schnell erstarrt 102, 104
Schnellarbeitsstahl 216, 251, 427 f.
Schrägeinschallung 382
Schrauben 414
Schrott 37, 39
Schrumpfmaß 290
Schrumpfung 65, 287, 317, 320
Schubdüse 449, 460
Schubmodul-Temperatur-Kurve 288
Schubspannung 286
Schubspannungshypothese 120
Schülpen 80
Schutz, gegen Korrosion 199
–, gegen Verzunderung 199
Schutzgas 140, 151, 182
Schutzgasatmosphäre 228
Schutzgasschirm 141
Schutzgasschweißen 147–151
Schwabbeln 127
Schwächung, Röntgen- und γ -Strahlen 377
schwarze Keramik 431
Schwarznickel 206
Schwefel 27, 31 ff., 41, 45, 143, 171, 177, 181, 352, 354
schwefelarm 168
Schwefelgehalt 132
Schwefelhexafluorid 563
Schweißbadsicherung 146
schweißbarer Stahl, hochfester 477
–, normalfester 477
Schweißbarkeit 141, 163, 171, 183 f., 480
Schweißbeigenspannung 169
Schweißbeignung 171, 184
Schweiß-Elektrodentypen 143
Schweißen 31, 138, 151, 155, 312, 459
–, aluminothermisches 158
–, Grundvorgang 138
–, Heizelement- 313

- , Hochfrequenz- 313 f.
- hochlegierter Stähle 175
- , Kunststoff 312
- , Metall-Aktiv-Gas- (MAG) 147, 149 f.
- , Metall-Inert-Gas- (MIG) 147, 149
- , Reib- 313
- , Thermokompressions- 535
- , Thermosonic- 535
- , Ultraschall- 313, 535
- , Warmgas- 313
- , Wolfram-Inert-Gas- (WIG) 147, 149 f.
- Schweißfehler 166 ff.
- Schweißfuge 143
- schweißgerechte Gestaltung 166
- Schweißmöglichkeit 184
- Schweißnaht 140, 151, 154, 163 f.
- , Ultraschallprüfung 382
- Schweißplattieren 210
- Schweißpulver 145
- Schweißsicherheit 184
- Schweißspannung 170
- Schweißzusatzwerkstoff 177
- schwer zerspanbarer Werkstoff 136
- Schwindmaß 86
- Schwindung 322
- Schwingfestigkeit 273
- Schwingungsdämpfung 408
- Sealing 223
- Seebeck-Effekt 510
- Seewasser 496
- Seigern 31, 89–92, 118, 231
- Sekundärhärte 427 f., 447
- Sekundärmetallurgie 30
- Sekundärmullit 321
- Sekundenkleber 197
- Selbstabschreckung 259 f.
- Selbstanlassen 242
- Selbstschärfen 435
- Selective Laser Melting 280
- SE-Metall 577
- Semi-Solid-Processing 277
- senkrechte Anisotropie 121
- Sensibilisierung 176
- für interkristalline Korrosion 182
- Sensor 539
- S-Glas 392
- Sheet Moulding Compound 395
- Sherardisieren 211
- Si_3N_4 434
- SiC 397
- SiC-Faser 396
- Sicherheitsbeiwert 368, 391
- SIEMENS-MARTIN-Verfahren 30
- Silber 416, 419, 514
- Silberlot 187
- Silicatkeramik 64 f., 318
- Silicium 37, 177, 526 f.
- Siliciumnitrid 434
- Silumin 98
- Sinterhilfsmittel 325
- Sinterkörper 419
- Sinterlager 419 f.
- Sintern 76, 101, 109 f., 298, 318
- von Hartmetall 429
- von Kunststoffpulver 298
- Sinterschmieden 283
- Sinterschwindung 109, 322
- Sinterteil 110
- , mechanische Eigenschaften 110
- Si-Solarzelle 549
- Slater-Koeffizient 567
- SMC 395
- Sn-Legierung 417
- Solarzelle 486, 549
- Sol-Gel-Prozess 67, 106
- Soliduslinie, verschleppte 91
- Sondercarbid 250
- Sondergusseisen 411
- Sondernitrid 269
- Sondersteatit 560
- Spaltkorrosion 340, 494
- Spanbildung 125
- Spanbruch 132
- Spanfläche 125, 128, 430
- Spannung, thermisch bedingte 225
- Spannungsarmglühen 173 f., 205, 229 f.
- Spannungsarmtempern 317
- Spannungsdurchschlag, thermischer 556
- Spannungslunker 94
- Spannungsreihe 336
- Spannungsrisssbildung 374
- Spannungsrissempfindlichkeit 317
- Spannungsrissskorrosion 374 f., 493 f., 501, 503
- , kathodische 35

- Spannungszustand 112 f.
 –, hydrostatischer 118
 Spanwinkel 125
 Sparbeize 338
 Sparbeizen 200
 Spectra 393
 Speiser 78, 86, 88
 Speisungsvermögen 96
 Sperrschicht-Effekt 539
 Sperrschicht-Halbleiter 539
 spezifische Festigkeit 366, 402
 spezifischer E-Modul 366
 Spinell 66
 Spinellgitter 575
 Spongiose 492
 Spritzen, elektrostatisches 219 f.
 –, Flamm- 208
 –, Hochgeschwindigkeitsflamm- 209
 –, Kaltgas- 209
 –, Lichtbogen- 208
 –, Plasma- 208
 –, thermisches 199, 208
 Spritzgießen 277, 293–296, 310, 325
 –, Duroplaste 296
 –, thermoplastische Kunststoffe 293
 Spritzgießform 426
 Spritzguss 276
 Spritzpressen 310
 Sprödbruch 413
 Sprödbruchanfälligkeit 33
 Sprödphase 131
 Sprühkompaktieren 276, 279
 Sprungtemperatur 518
 Sputtern 212 f., 272, 326
 stabile Wachstumsfront 93
 Stabilisator 63
 stabilisierter Stahl 176
 Stabilität 365
 Stahl 26, 29, 31, 95, 171, 224, 443
 –, anlassbeständiger 250
 –, ausscheidungshärtender ferritisch-perlitischer AFP 463, 466
 –, austenitischer 175, 177, 359, 487, 490
 –, beruhigter 42
 –, Complex-Phasen- 464
 –, Cr-, ferritischer 495
 –, CrNi-, aushärtbarer 496
 –, CrNi-, austenitischer 494
 –, druckwasserstoffbeständiger 36, 489
 –, Dualphasen- 464
 –, Duplex- 174, 496
 –, Feinkorn- 263 f., 478 f.
 –, Feinkornbau- 479
 –, ferritisch-austenitischer 496
 –, ferritischer 175, 177, 492 f.
 –, für den Maschinenbau 404
 –, für den Stahlbau 404
 –, hochfester 35, 205
 –, hochfester Konstruktions- 250
 –, hochlegierter 174
 –, hochlegierter, austenitischer 174
 –, hochlegierter, austenitisch-ferritischer 174
 –, hochlegierter, ferritischer 174
 –, hochlegierter, martensitischer 174
 –, höchstfester 388, 406, 446, 448
 –, hochstickstoffhaltiger 494
 –, kaltzäher 489
 –, korrosionsbeständiger 175, 492
 –, legierter 243 f.
 –, martensitisch-aushärtender 446 ff.
 –, martensitischer 174, 493
 –, Mehrphasen- 463 f.
 –, mikrolegierter 255, 463
 –, niedriglegierter 349
 –, rostträger 491
 –, Schiffbau- 480 f.
 –, Schnellarbeits- 251
 –, schweißbarer, hochfester 477
 –, schweißbarer, normalfester 477
 –, stabilisierter 176 f.
 –, TRIP- 464
 –, unberuhigter 42
 –, unlegierter 274
 –, warmfester 250, 483, 486 ff.
 stahlähnlich 409
 Stahlbau 476
 Stahlguss 80, 411 f.
 Standard-Versuch 371
 Standweg 128
 Standzeit 128
 stängelige Kristallausbildung 93
 stängeliges Kristallwachstum 164
 Stapelfaser 330
 Stapelfehlerenergie 122

Steatit 559 f.
Steifigkeit 366
Steiger 86
Stein 21
Steinchen 75
Stichabnahme 114
Stickstoff 33, 44 f., 176, 268
Stirnabschreckversuch, nach Jominy 248
Stoffeigenschaftändern 76
Stoffleichtbau 384
Stoffmagnetismus 564
Störstellenhalbleitung 523
Strahlen 200
Strahlenbelastung 462
Strangaufweitung 292
Stranggießen 41 f.
Strangguss 25, 30
Strangpressen 26, 108, 117 f., 319, 323
Streckenenergie 172
Streckgrenzenverhältnis 414
Streckziehen 114, 119 f., 301
Streifeld 376
Streuung 377
Streuvermögen 204
ST-Richtung 436
stromloses Metallabscheiden 206
Stückigmachen 19
Stufenauslagern 438
Stützwirkung 478
Styropor 299
Sublimierschneiden 136
Substrat 189, 199
Sulfideinschluss 41
Sulfidieren 352
Sulfonitrieren 272
Sulfonitrocarburieren 272
Superferrit 493
Superlegierung 353
superplastische Verformung 106, 124, 276, 284 f., 325
Supraleiter 517 f., 520
–, Hochtemperatur- 520
–, Typ I 518
–, Typ II 518
synthetische Kautschuksorten 310
synthetisches Öl 364

T

ta-C 72
Tailored Blanks 465
Talk 64
Target 213, 215
Tauchhärtung 260
Taupunkt-Korrosion 354
Teeranstrich 346
teilkristallin 300
Temperaturkoeffizient 515
– des elektrischen Widerstandes 509 f.
Temperaturwechselbeständigkeit 560
Temperguss 409
–, schwarzer (GJMB) 409
–, weißer (GJMW) 410
Textur 332
thermisch bedingte Spannung 225
thermische Nachbehandlung 316
– bei Kunststoffen 316
thermisches Härten 331
thermisches Spritzen 199, 208
thermisches Trennen 136
Thermistor 525, 541
–, NTC- 541
–, PTC- 541
Thermitschweißen 158
thermochemisches Verfahren 257
Thermoelektrizität 510
Thermoelement 511, 516
Thermofixieren 302
Thermokompressions-Schweißen 535
thermomagnetische Behandlung 573
thermomechanische Behandlung 254 ff., 446, 490, 573
Thermoplaste, amorphe 288
–, teilkristalline 288
thermoplastisch 286
thermoplastische Glasmatte 395
Thermosonic-Schweißen 535
Thermospannung 510
Thixoformen 276 ff.
Thixogießen 278
Thixoschmieden 278
thixotrop 278
Thomas-Verfahren 30, 37 f.
Thyristor 539
Ti-Aluminid 453, 470

Tiefziehen 114, 119 f., 301
–, thermoplastische Kunststoffe 301
Tiefziehstahl 123
Tiegelziehverfahren 528
Ti-Legierung 131, 449, 452
Titan 53, 124, 176, 345, 385, 400, 444, 477, 503
–, Hochtemperatur 452
–, Korrosionsverhalten 503
–, Leichtbau 385, 400, 444
–, Verarbeitung 122, 131, 182, 452
Titanat 66
Titanherstellung 53
Titanschwamm 54
Titan-Werkstoff, Schweißen 182
Tockenzerspannung 431
Ton 65
Tonerde 36
Tonmineral 321
Tonsubstanz 64 f.
Topfzeit 198, 218
Torsion 257 f.
Trärgas 229, 266
Transformation Induced Plasticity TRIP 464
Transistor 539, 544
–, bipolarer 544
–, FET- 545
–, MOS- 545 f.
Transrapid 476
Transversalwelle 379 f.
traps 34
treibende Kraft 109
Treibmittel 298 f.
Trennen 76
–, thermisches 136
tribochemischer Verschleiß 358
Tribologie 355
Tribooxidation 362
Tribosystem 355
Triebwerk 449
Triode 544
TRIP-Stahl 464
Trockenbearbeitung 133
Trockenguss 80
Trockenreibung 415
Trocknen 320
– wasserhaltiger Tonmassen 320

Tropfenübergang 148 f.
Turbinenschaufel 353, 451, 454 f.
Turbinenscheibe 454, 457 f.

U

Überalterung 166, 235, 333
übereutektoider Stahl 424
Übergangstemperatur 31, 34, 239
übersättigter Mischkristall 166
Überzug 341
–, edler 341
–, metallischer 341
–, unedler 341
UF 304
UHMW-PE 393
Ultrafeinkornhartmetall 431
Ultrahochvakuum 462
Ultraschall US 379
–, longitudinal 379
–, transversal 379
Ultraschallerzeugung 583
Ultraschallgeber 584
Ultraschallprüfung 379, 381 ff.
Ultraschallschweißen 162, 313, 535
Ultraschallumwandlung 583
Umformarbeit 121
Umformbarkeit 120
Umformen 76, 111 f.
–, Halbwarm- 124
–, Kalt- 124
–, superplastisches 124
–, thermoplastisches Halbzeug 300
–, Warm- 124
Umformgefüge 99
Umformgeschwindigkeit 112
Umformgrad 112
Umformparameter 124
Umformverfahren 114
Umformverhalten 122
Umhüllung 141
–, basische (Kb) 143
–, Rutil- (R) 143
Umschmelzbehandlung 424
Umwandlung, α/γ 166
unberuhigte Erstarrung 42
Ungänzen 168
unlegierter Stahl 274
Unterdruckaufkohlung 266

- untere Bainitstufe 251
- untereutektische Legierung 278
- untereutektischer Stahl 424
- Unterkühlung 92, 94 f., 97
- , konstitutionelle 92, 95
- Unterpulverschweißen 144 ff.
- UP 144, 303, 306
- Urformen 76
- US-Schweißen 536
- V**
- Vakuumbehandlung 33, 43
- Vakuumform 81
- Vakuuummschmelzen 44
- Valenzband 507
- Vanadium 255, 352, 477
- Varistor 542
- Verarbeitbarkeit 77
- Verarbeitungstemperatur, Polymere 288
- Verarbeitungsviskosität 304
- Verbindungshalbleiter 524 f., 531
- Verbindungsschicht 269–272
- Verbrennen 233, 333
- Verbundbauweise 386 f.
- Verbundfestigkeit 390, 394
- Verbundlager 418
- Verbundwerkstoff 306, 309, 387 f., 441, 460
- , CFK- 395, 446, 454, 462
- , faserverstärkter 441
- mit keramischer Matrix CMC 389, 398 f.
- mit Metallmatrix MMC 389, 395 f.
- mit Polymermatrix PMC 389, 391, 395
- Verchromen 205, 342
- , Stahlteile 343
- Verdichter 449
- Verdichterschaukel 452
- Verdüsen von Schmelzen 102
- Veredeln 131
- vereinigter Wärmewert 130
- Verfahren, BESSEMER- 30
- , PVD- 67 f., 212
- , SIEMENS-MARTIN- 30
- , Thomas- 30, 37 f.
- Verfahrenstechnik 486
- Verfestigung 111
- Verfestigungsexponent 121
- Verformbarkeit 111, 122
- Verformung, superplastische 325
- , viskoelastische 287, 300
- , viskose 300, 327
- Verformungsgefüge 99
- Verformungstextur 111, 332
- Verformungsverfestigung 122
- Vergüten 173 f., 249, 413, 478, 490
- Vergütungsgefüge 175
- Vergütungsstahl 250, 403–406, 446 f.
- verlorene Form 82
- verlorenes Modell 82
- Verlustfaktor 558
- , dielektrischer 554
- Verlustleistung 554
- Vernetzen 63
- Vernickeln 206
- , stromloses 206 f.
- Verschleiß 113, 128, 130, 257, 273, 355 ff., 359, 415
- , tribochemischer 358
- Verschleißmarkenbreite 128
- Verschleißmechanismus 356, 359
- Verschleißpartikel 357
- Verschleißschutz 199, 361
- Verschleißsystem 356, 359
- Verschleißwiderstand 260
- Verschweißen 415, 513
- Verschweißneigung 415 f.
- Versetzungskriechen 451
- Versprödung 33, 166, 332
- , 300 °C- 33, 250, 447
- , 475 °C- 178
- , 500 °C- 250
- Verstärkungskomponente 388
- Verstärkungsmittel 63
- Verstrecken 302
- , Thermoplaste 302
- Verzerrung, optische 75
- Verzinkung 207, 342, 346
- Verzinnen 207
- Verzug 273, 289 f., 332, 334
- Verzundern 228, 333, 348–351, 353
- von Eisen 351
- Verzunderungsschutz 199
- Vinylharzlack 345 f.
- viskoelastische Verformung 287, 300
- viskose Verformung 300, 327
- Viskosität 286, 304, 327

- Vollformgießen 81
Vollhartmetallwerkzeug 430 f.
Volumenabnahme 290
Volumen-Halbleiter 539
Volumenschumpfung 303
Vorlegierung 24
Vorwärmen 172 ff., 178
Vorwärmtemperatur 172, 175
Vulkanisation 311
- W**
- Wachstumsfront, instabile 92
–, stabile 93
Wachstumstextur 332
Wafer 532, 537
Wagenkörper 474
Walzen 26, 114
–, kontrolliertes 255
Walzfaser 36, 99, 111
Wälzlager 358, 414
–, keramisches 414
Walzplattieren 209
Wannenlage 146
Warmarbeitsstahl 426, 447
Warmmaushärten 198, 235
Warmbadhärten 227, 247, 264
Wärmebehandlung 224
– von Werkzeugstahl 425
Wärmedämmschicht 354
Wärmeeinflusszone WEZ 137, 140 f.,
151–154, 164 f., 171–174, 176, 478
Wärmenachbehandlung 176
Wärmeschutzschild 461
Wärmewert, vereinigter 130
warmfester Stahl 250
Warmfestigkeit, von Al-Werkstoffen 440
Warmgasschweißen 313
warmhärtend 195
Warmkammerverfahren 84
Warmpressschweißen 139
Warmriss 85, 94, 164, 168, 177, 181, 412
Warmrissbildung 96
Warmrissneigung 95
Warmschweißen 178
Warmsetzen 413
Warmstreckgrenze 486
Warmumformung 112, 124
Warmverformung 111, 114, 123
–, CuZn-Legierung 123
–, Stahl 123
wartungsfreies Lager 101
wash primer 201
Wassergas-Reaktion 265
Wasserlack 219
Wasserstoff 20, 34, 44 f., 204 f., 207
Wasserstoffaustreiben 205
Wasserstoffbeladung 168
Wasserstoffkorrosion 34
Wasserstoffkrankheit 181, 512
Wasserstoffporosität 180
Wasserstoffversprödung 34 f., 171, 205
Wasserstrahlschneiden 138
Wechselstromschweißen 144
Weichglühen 123, 231 f., 252 ff.
Weichlot 187
–, bleifreies 187
Weichlöten 186
Weichmacher 63
Weichmachereffekt 393
weichmagnetisch 570, 572 f., 575
Weichschaum 299
weiße Keramik 431
weiße Schicht 269
Weißmetall 417
Weisscher Bezirk 565
Wendeschneidplatte 430
Werkstoff, dispersionsgehärteter 101
–, einphasiger 224, 232
–, Fe-reicher 573
–, hartmagnetischer 576
–, hitzebeständiger 349
–, hochfester 229
–, Hochleistungs- 276
– in Luft- und Raumfahrt 436
–, korrosionsbeständiger 490
–, mehrphasiger 224, 232
–, nanokristalliner 102, 105 f.
–, schwer zerspanbarer 136
–, weichmagnetischer 572 f.
–, zunderbeständiger 349 f.
Werkstoffversprödung 332
Werkzeugstahl 250, 424 f.
Werkzeugverschleiß 128
WEZ 137, 140 f., 151–154, 164 f.,
171–174, 176, 478

- Whisker 396
Wickeln 307, 309 f.
Widerstandspunktschweißen 159
Widerstandswerkstoff 515 f.
Widmannstättenferrit 412
Wiedererwärmungsriß 168
WIG-Verfahren 178
Windenergie 484
Windkraftanlage (WKA) 484
Wirbelbett 220
Wirbelstromprüfung 383
Wirbelstromverlust 570, 572
Wolfram 514
Wolframeinschluss 167
Wolfram-Elektrode 150
Wolfram-Inert-Gas-Schweißen (WIG) 147, 149 f.
Würfeltextur 571
Wüstit 351
- Y**
- Yttrium 353
- Z**
- Zähigkeit 33 f., 41, 111, 239, 405, 414, 477, 481, 490
Zähigkeitsverlust 178
Zahnrad 358
Zahnradwalzen 114
Zeilengefüge 36, 131
Zeit-Temperatur-Auflösungs-Diagramm
ZTA 234
Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm
ZTU 172, 175, 234, 240
Zementiteinförmung 252 f.
Zener-Diode 544
Zerspanbarkeit 129–132, 254
Zerspanen 77, 125, 311
–, Kunststoff 311
Zerspanungsparameter 126
Ziegler-Natta-Katalysator 60
Ziehglas 329
Zink 336, 342, 345
Zinkphosphatschicht 221 f.
Zinkseife 222
Zinn 329, 342, 415 f.
Zinn-Legierung 187
Zipfelbildung 123
Zirkonium 33, 440
Zonenschmelzen 529 f.
Zonenziehverfahren 528 f.
ZrO₂-Sonde 265
Zugdruck-Umformen 114
Zugeigenspannungen 169
Zugspannung 437
zunderbeständiger Werkstoff 349 f.
Zunderbeständigkeit 487
Zunderverlust 116
Zündkerze 324
Zusatzwerkstoff 164
Zweikomponenten-Klebstoff 195
Zwischenabkühlung 175
Zyanidelektrolyt 205
Zyklusreihenfolge 372
Zylinderkopf 468
Zylinderlaufbuchse 467