

# 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 irriгigen 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 Zuverlässigkeitseiveau 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 Buchumfangs 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.

Berlin im April 2021

*Wolfgang Bergmann*

# Inhaltsverzeichnis

<b>E</b>	<b>Werkstoffherstellung</b>	
<b>1</b>	<b>Herstellung von Metallen</b>	17
<b>1.1</b>	<b>Metallurgische Verfahren</b>	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
<b>1.2</b>	<b>Eisen und Stahl</b>	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
<b>1.3</b>	<b>Aluminium</b>	46
<b>1.4</b>	<b>Kupfer</b>	47
<b>1.5</b>	<b>Nickel</b>	50
<b>1.6</b>	<b>Titan</b>	53
<b>1.7</b>	<b>Magnesium</b>	54
<b>2</b>	<b>Herstellung von Kunststoffen</b>	55
<b>2.1</b>	<b>Technische Durchführung von Polyreaktionen</b>	55
<b>2.2</b>	<b>Chemischer Ablauf von Polyreaktionen</b>	57
2.2.1	Polymerisation	57
2.2.2	Polykondensation	60
2.2.3	Polyaddition	61
<b>2.3</b>	<b>Aufbereitung des polymeren Rohstoffs zum polymeren Werkstoff</b>	63
<b>3</b>	<b>Herstellung nichtmetallisch-anorganischer Werkstoffe</b>	64
<b>3.1</b>	<b>Keramik</b>	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
<b>3.2</b>	<b>Glas .....</b>	<b>72</b>
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**

<b>1</b>	<b>Verarbeitung metallischer Werkstoffe .....</b>	<b>76</b>
<b>1.1</b>	<b>Gießen .....</b>	<b>78</b>
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
<b>1.2</b>	<b>Galvanoformen .....</b>	<b>100</b>
<b>1.3</b>	<b>Pulvermetallurgie .....</b>	<b>101</b>
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

---

<b>1.4</b>	<b>Umformen</b>	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
<b>1.5</b>	<b>Zerspanen</b>	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
<b>1.6</b>	<b>Erodieren</b>	135
<b>1.7</b>	<b>Thermisches Trennen</b>	136
<b>1.8</b>	<b>Schweißen</b>	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	Schutzbogenschweißen	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 Schmelzschweißen von Eisenwerkstoffen . . . . .	171
1.8.4.6	Probleme beim Schmelzschweißen von Nichteisenmetallen . . . . .	179
1.8.4.7	Probleme beim Schmelzschweißen verschiedenartiger Metalle . . . . .	183
1.8.4.8	Schweißbarkeit . . . . .	183
<b>1.9</b>	<b>Löten . . . . .</b>	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
<b>1.10</b>	<b>Kleben . . . . .</b>	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
<b>1.11</b>	<b>Beschichten . . . . .</b>	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
<b>1.12</b>	<b>Wärmebehandlung . . . . .</b>	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
<b>1.13</b>	<b>Spezielle Verfahren zur endformnahen Herstellung von Bauteilen</b>	<b>276</b>
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
<b>2</b>	<b>Verarbeitung von Kunststoffen</b>	<b>286</b>
<b>2.1</b>	<b>Verarbeitungseigenschaften</b>	<b>286</b>
2.1.1	Unvernetzte Polymere (Thermoplaste)	286
2.1.2	Vernetzte Polymere	289
<b>2.2</b>	<b>Spanlose Formgebung thermoplastischer Kunststoffe</b>	<b>290</b>
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
<b>2.3</b>	<b>Spanlose Formgebung vernetzender Kunststoffe . . . . .</b>	<b>303</b>
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
<b>2.4</b>	<b>Zerspanen . . . . .</b>	<b>311</b>
<b>2.5</b>	<b>Fügen . . . . .</b>	<b>312</b>
2.5.1	Schweißen . . . . .	312
2.5.2	Kleben . . . . .	314
<b>2.6</b>	<b>Beschichten . . . . .</b>	<b>315</b>
<b>2.7</b>	<b>Thermische Nachbehandlungen . . . . .</b>	<b>316</b>
<b>3</b>	<b>Verarbeitung nichtmetallisch-anorganischer Werkstoffe . . . . .</b>	<b>318</b>
<b>3.1</b>	<b>Keramik . . . . .</b>	<b>318</b>
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
<b>3.2</b>	<b>Glas . . . . .</b>	<b>327</b>
3.2.1	Formgebung . . . . .	327
3.2.2	Nachbehandlungen . . . . .	331
<b>4</b>	<b>Verarbeitungsbedingte Eigenschaftsänderungen . . . . .</b>	<b>332</b>
<b>G</b>	<b>Werkstoffanwendung</b>	
<b>1</b>	<b>Korrosions-, Verzunderungs-, Verschleißschutz . . . . .</b>	<b>335</b>
<b>1.1</b>	<b>Korrosionsschutz . . . . .</b>	<b>335</b>
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
<b>1.2</b>	<b>Schutz gegen Hochtemperaturkorrosion . . . . .</b>	<b>348</b>
1.2.1	Verzundern . . . . .	348
1.2.2	Heißgaskorrosion . . . . .	351
1.2.3	Schutzmaßnahmen . . . . .	352
1.2.4	Niedertemperatur-Korrosion (Taupunkt-) . . . . .	354
<b>1.3</b>	<b>Verschleißschutz . . . . .</b>	<b>355</b>
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	Ermüdungsverschleiß . . . . .	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
<b>2</b>	<b>Leichtbau . . . . .</b>	<b>365</b>
<b>2.1</b>	<b>Gewichtsminderung und Betriebssicherheit . . . . .</b>	<b>365</b>
<b>2.2</b>	<b>Betriebsfestigkeit . . . . .</b>	<b>368</b>
<b>2.3</b>	<b>Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung . . . . .</b>	<b>375</b>
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
<b>2.4</b>	<b>Leichtbauweisen . . . . .</b>	<b>384</b>
2.4.1	Stoffleichtbau . . . . .	384
2.4.2	Formleichtbau . . . . .	385
<b>3</b>	<b>Leichtbauwerkstoffe . . . . .</b>	<b>388</b>
<b>3.1</b>	<b>Verbundwerkstoffe . . . . .</b>	<b>388</b>
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
<b>3.2</b>	<b>Leichtmetalle</b> . . . . .	400
3.2.1	Aluminium-, Titan-Legierungen . . . . .	400
3.2.2	Magnesium-Legierungen . . . . .	400
3.2.3	Beryllium-Werkstoffe . . . . .	401
<b>4</b>	<b>Werkstoffe im Maschinenbau</b> . . . . .	403
<b>4.1</b>	<b>Bauteile</b> . . . . .	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
<b>4.2</b>	<b>Federn</b> . . . . .	413
<b>4.3</b>	<b>Verschraubungen</b> . . . . .	414
<b>4.4</b>	<b>Lager</b> . . . . .	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
<b>4.5</b>	<b>Gehäuse</b> . . . . .	422
<b>4.6</b>	<b>Dichtungen</b> . . . . .	422
<b>5</b>	<b>Werkstoffe in der Fertigungstechnik</b> . . . . .	424
<b>5.1</b>	<b>Werkzeugstähle</b> . . . . .	424
<b>5.2</b>	<b>Schneidstoffe</b> . . . . .	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
<b>6</b>	<b>Werkstoffe im Verkehrswesen</b> . . . . .	436
<b>6.1</b>	<b>Werkstoffe in der Luft- und Raumfahrt</b> . . . . .	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
<b>6.2</b>	<b>Werkstoffe im Automobilbau</b> . . . . .	463
6.2.1	Karosserie . . . . .	463
6.2.2	Motor . . . . .	465
6.2.3	Fahrwerk . . . . .	470
<b>6.3</b>	<b>Werkstoffe im Schienenfahrzeugbau</b> . . . . .	472
<b>6.4</b>	<b>Werkstoffe im Stahl- und Schiffbau</b> . . . . .	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
<b>7</b>	<b>Werkstoffe in der Energie- und Verfahrenstechnik</b> . . . . .	483
<b>7.1</b>	<b>Warmfeste Stähle</b> . . . . .	486
<b>7.2</b>	<b>Kaltzähe Stähle</b> . . . . .	489
<b>7.3</b>	<b>Korrosionsbeständige Werkstoffe</b> . . . . .	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
<b>8</b>	<b>Werkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik</b> . . . . .	505
<b>8.1</b>	<b>Werkstoffe mit Leitfunktion</b> . . . . .	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
<b>8.2</b>	<b>Werkstoffe mit Isolierfunktion . . . . .</b>	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
<b>8.3</b>	<b>Werkstoffe mit magnetischer Funktion . . . . .</b>	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
<b>8.4</b>	<b>Werkstoffe mit dielektrischer Funktion . . . . .</b>	579
8.4.1	Kondensatorwerkstoffe . . . . .	579
8.4.2	Ferroelektrika . . . . .	581
8.4.3	Piezoelektrizität, Pyroelektrizität . . . . .	583

## **H Tabellenanhang**

<b>1</b>	<b>Metallische Werkstoffe . . . . .</b>	585
<b>2</b>	<b>Polymerwerkstoffe . . . . .</b>	599
<b>3</b>	<b>Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe . . . . .</b>	603
<b>4</b>	<b>Werkstoffe der Elektrotechnik . . . . .</b>	606
<b>Quellenverzeichnis und weiterführende Literatur . . . . .</b>		612
<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>		632

# E Werkstoffherstellung

## 1 Herstellung von Metallen

### 1.1 Metallurgische Verfahren

Abgesehen von *Edelmetallen*, die in der Erdrinde „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 Auftriebwirkung nach oben getragen. An der Oberfläche wird ein mit Erz um einen Faktor bis 10 angereicherter Schaum abgezogen.

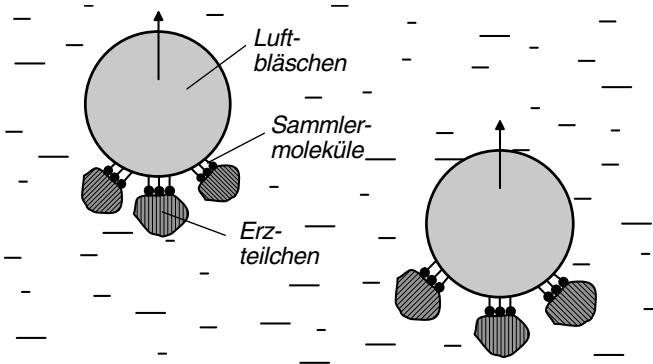


Abb. E.1-1 Erzanreicherung durch Flotation (nach Lit. E.8)

Die Feinmahlung des Erzes ist jedoch für eine Verhüttung in einem Schachtofen (z. B. Hochofen), in dem das zu einer Schüttssäule 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 Titan-tetrachlorid 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 Basenanhdydride ein basisches Verhalten, Oxide von Nichtmetallen wie SiO<sub>2</sub> oder P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> führen als Säureanhdydride zu einem sauren Verhalten. Entscheidend ist, dass bei der Neutralisation eines sauren Oxids, z. B. SiO<sub>2</sub> 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 (SiO<sub>2</sub>) 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 oberen Bereich des Diagramms mit niedriger(!) Bildungsenthalpie erscheinen die Edelmetalle, im unteren Bereich mit hoher Bildungsenthalpie die stark sauerstoffaffinen Metalle.

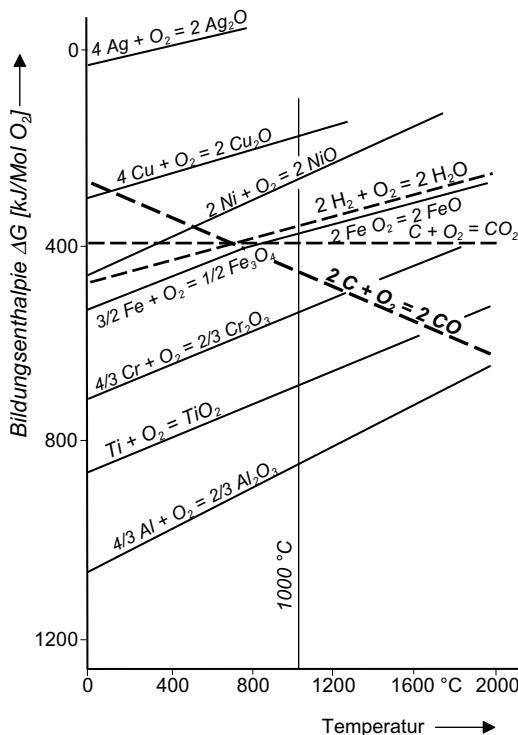


Abb. E.1-2 Bildungsenthalpien von Metall/Metallocid-Reaktionen in Abhängigkeit von der Temperatur (Richardson-Ellingham-Diagramm, nach Lit. E.9)

Je größer die Bildungsenthalpie einer Metall/Metallocid-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<sub>2</sub>S 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.

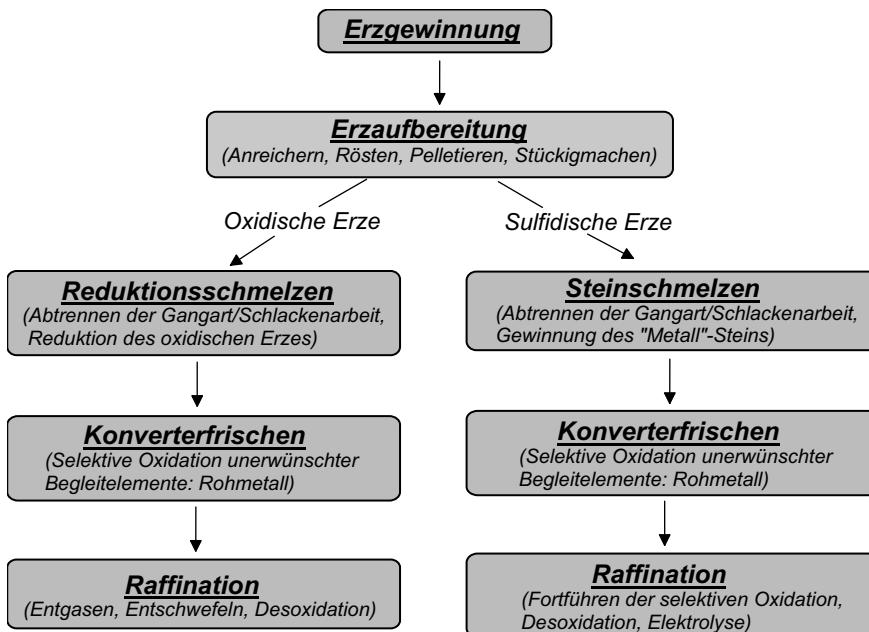


Abb. E.1-3 Verfahrensschritte der pyrometallurgischen Metallgewinnung (schematisch)

### 1.1.2.2 Hydrometallurgie

Bei der hydrometallurgischen Metallgewinnung wird die Metallkomponente mit einer reaktiven Flüssigkeit – häufig Schwefelsäure, manchmal Ammoniak – aus dem Erz herausgelauft. Die *Erzlaugung* kann sowohl am geförderten und aufbereiteten 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 ausgefällten 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Beide Verbindungen bilden bei 10 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ein bei 962 °C schmelzendes *Eutektikum*, während die Schmelztemperaturen von Kryolith und von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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- (Vakumentgasen, 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 Potenzials 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 Abscheidepotenzial 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 Abscheidepotenzial der Verunreinigungen nicht in kritischer Nähe zum Potenzial des Metalls liegt, ist der Elektrolyt kontinuierlich oder in gewissen Zeitabständen zu regenerieren, da das Abscheidepotenzial konzentrationsabhängig ist. Edelmetalle gehen aufgrund ihres Potenzials 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 *Ferrolegierungen* 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 Ferrolegierungen 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.

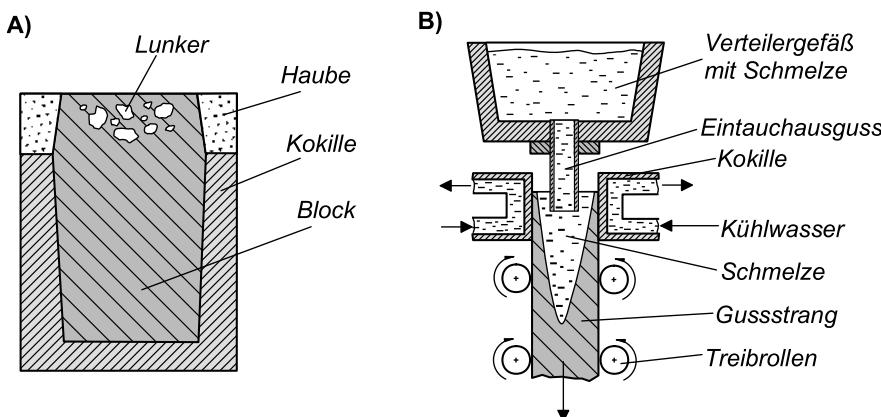


Abb. E.1-4 Rohguss; A) Blockguss, B) Strangguss

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 Verfahrens 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

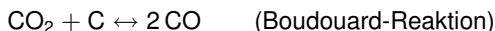
Die Hauptreaktion des Hochofenprozesses besteht in der *Reduktion* von Eisenerz mit Hilfe von Kohlenmonoxid zu einer stark verunreinigten und kohlenstoffreichen Eisenschmelze, dem *Roheisen*. Die wichtigsten eisenhaltigen Minerale in Eisenerzen sind die Oxide Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

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  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ -Verhältnis von etwa 1 eine leichtflüssige Schlacke zu erhalten. Die Zuschläge sind vor allem Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ) oder Dolomit ( $(\text{CaMg})\text{CO}_3$ ). Die Carbonate zersetzen sich unter  $\text{CO}_2$ -Abspaltung zu Oxiden. Mit dem „gebrannten“ Kalk  $\text{CaO}$  wird ein großer Teil des vorwiegend mit Koks eingeschleppten *Schwefels* als  $\text{CaS}$  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  $\text{CO}$ , das im Hochofenprozess als Reduktionsmittel wirkt. Zur Verbrennung des Kokses wird auf ca. 1 100 °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  $\text{CO}$  erfolgt und hierfür eine ausreichende Durchströmbarkeit des Hochofeneinsatzes gegeben sein muss.

Für die Vorgänge im Hochofen ist das so genannte *Boudouard-Gleichgewicht* zwischen C,  $\text{CO}$  und  $\text{CO}_2$  bestimmd. Gemäß der Reaktion



wird das bei der Reduktion von Eisenoxid durch  $\text{CO}$  entstandene  $\text{CO}_2$  durch Reaktion mit Kohlenstoff wieder zu  $\text{CO}$  zurückgebildet und steht für eine Reduktion erneut zur Verfügung.

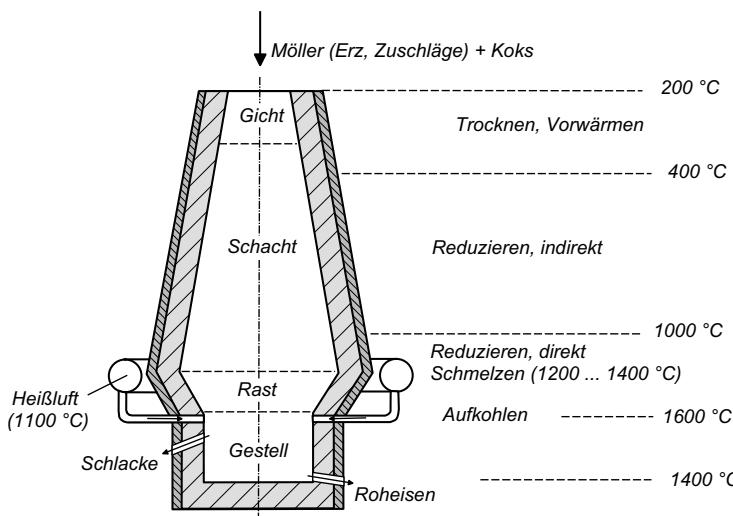


Abb. E.1-5 Hochofen

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 % CO<sub>2</sub> liegt. Die Reduktion von CO<sub>2</sub> zu CO läuft im Hochofen nur bei Temperaturen oberhalb von 1000 °C ab.

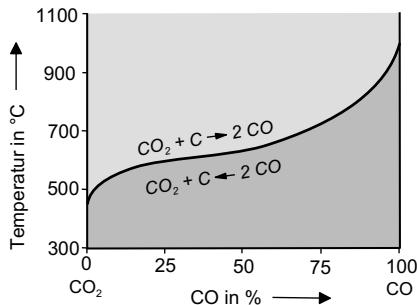


Abb. E.1-6 Boudouard-Gleichgewicht

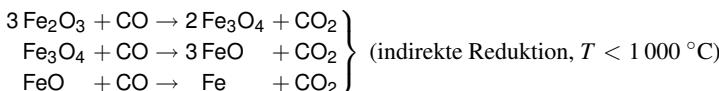
Im Hochofen verbrennt der Koks direkt vor den Eintrittsdüsen der Heißluft nach der stark *exothermen* Reaktion:  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ , die Temperaturen von über 2000 °C liefert. Dieses CO<sub>2</sub> wird jedoch in der weiteren Umgebung entsprechend dem Boudouard-Gleichgewicht 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 CO<sub>2</sub> oxidiert wird. Bei Temperaturen über 1000 °C setzt sich dieses CO<sub>2</sub> 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  $\text{CO}_2$  nicht mehr zu  $\text{CO}$ , es wird nun von indirekter Reduktion gesprochen. Es laufen im Schacht folgende Reaktionen ab:



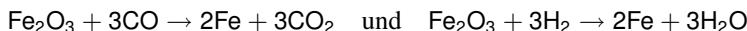
Für den Hochofenbetrieb ist die indirekte Vorreduktion im Schacht bei niedrigeren Temperaturen außerordentlich wichtig. Müsste nämlich im unteren Ofenbereich (Rast) das gesamte Eisenerz aus seinem dreiwertigen Oxidationszustand  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  reduziert werden, so würde diese im Gegensatz zur 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  $\text{CO}/\text{H}_2$ -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  $\text{Fe}_3\text{C}$ -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 Gangartanteil 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 Hochofenmörller 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 durchgeföhrten 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 Härtung, 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 Edelstählen 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 **Schwefelgehalt** 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  $\gamma$ -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.

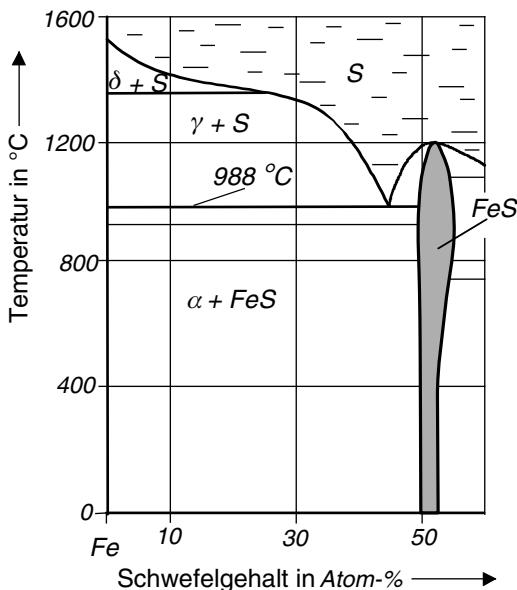


Abb. E.1-7 Zustandsdiagramm Fe-FeS (nach Lit. B.2)

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 ersticken, sich also schon in der Eisenschmelze zu bilden und sich daher innerhalb der später erstarrnden Eisenkörner globular anzuordnen (Abb. E.1-8).

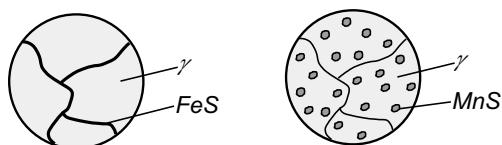


Abb. E.1-8 Anordnung von FeS- und MnS-Einschlüssen in erstarrtem Stahl

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 Edelstählen 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 *versprödend* und muss auch wegen seines ungünstigen Zusammenwirkens mit Schwefel bei der Auslösung von *Heißrissigkeit* 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

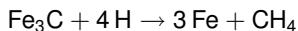
reduzierender  $H_2$ -haltiger Atmosphäre aufgenommen haben. Offenbar ist die Ausdiffusion des Wasserstoffs bei großen Teilquerschnitten stark behindert, und es kommt beim Abkühlen wegen der abnehmenden Löslichkeit, die sich beim Übergang  $\gamma \rightarrow \alpha$  nochmals um etwa 1/3 verringert, 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  $H_2$ -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 Eisencarbideteilchen  $\text{Fe}_3\text{C}$  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 ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sulfidische ( $\text{MnS}$ ) und silicatische ( $\text{MO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{MO}$  = Metalloxid) Verbindungen. Außerdem können solche Einschlüsse auch aus der metallurgischen Schlacke stammen und beim Röhren 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (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. *Gröbere 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  
Aktivlöten 326  
Akzeptor 524  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  397  
 $\text{AlCuMg}$  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  
 $\text{AlMg}$  3 475  
 $\text{AlMgSi}$  465  
 $\text{AlMgSi}$  1 474

$\text{AlMgZn}$  1 474  
Alnico-Magnet 577 f.  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Faser 396  
Alterung 33, 193  
Aluminieren 211  
Aluminium 179 f., 345, 400, 416, 511  
–, Herstellung 46  
–, Korrosionsbeständigkeit 497 f.  
Aluminiumguss 80  
Aluminiumnitrid  $\text{AlN}$  34  
Aluminium-Werkstoff, Schweißen 179  
aluminothermisches Schweißen 158  
Al-Werkstoff 449  
 $\text{AlZnMgCu}$  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  
Antistatikmittel 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  
 Aufhärtbarkeit 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) Elektrodentyp 143  
 Basizität 20  
 BaTiO<sub>3</sub> 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  
 Bindefase, metallische 428  
 Biphenyl, polychloriertes, PCB 563  
 Bitumenanstrich 346  
 Blasen 300, 328  
 Bläuen 222  
 Blausprödigkeit 33  
 Blechschweißen 159  
 Blechumformen 119  
 Blei 344 f., 415 f.  
 Blei-Zinn-Legierung 187  
 Bleizirkonat-Titanat 584  
 Blisk 454  
 Blochwand 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  
Bonbern 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  
Brüñieren 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 Härt(en) 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  
CO<sub>2</sub>-Gaslaser 155 f.  
CO<sub>2</sub>-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  
 Direkthärtens 263  
 Direktreduktion 29  
 dispersionsgehärterter Werkstoff 101  
 Dispersionsgrad 236  
 Dispersionshärten 236  
 DLC-Schicht 71 f.  
 Domäne 565  
 Domänenstruktur 581  
 Donator 523  
 Doppelbindung 57  
 Doppelextruder 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  
 Dünnfilmtechnik 537  
 Dünnschichttechnologie 212  
 Duplexstahl 174, 496 f.  
 Durchgangswiderstand 555  
 Durchhärtung 243  
 Durchschallungsverfahren 381  
 Durchschlag, elektrischer 557  
 Durchschlagfestigkeit 555 f.

**E**

Edelmetall 24, 51  
 –, gediegene 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  
–, größerer 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  
Elektrodentyp, 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  
Entkühlungstiefe 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.  
 $\epsilon$ -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  
 –,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 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.  
 –, perlitärmer 479  
 –, perlitfreier 479  
 Feinlunker 88 f.  
 Feinperlitisieren 473  
 Feinstkornhartmetall 431  
 Feinwanderung 513  
 Feldeffekttransistor, unipolarer 544  
 Feldspat 64 f.  
 FeNi-Werkstoff 574  
 Fe-reicher Werkstoff 573  
 Fernfeld 380  
 ferrimagnetisch 565, 568  
 Ferrit 66, 568, 575  
 –,  $\delta$ - 177  
 –, hartmagnetischer 576  
 –, hexagonaler 576  
 –, weichmagnetischer 575  
 ferritischer Stahl 175, 492 f.  
 Ferroelektrika 583 f.  
 Ferroelektrizität 552, 579, 581  
 Ferrolegierung 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  
 $\gamma$ -Phase 454 f.  
 $\gamma$ -Strahlen 377, 379  
Gangart 17  
Gasaufkohlen 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 Härt(en) 247  
Gefüge 164  
–, bainitisches 171  
–, martensitisches 171  
–, nanokristallines 106  
Gefügeanisotropie 332  
Gefügeverfeinerung 239  
Gefügezeile 332  
Gefügezeiligkeit 111, 132, 168  
Gehäusewerkstoff 422  
Gelcoat 307  
gelenkte Erstarrung 87, 99  
Gelzustand 290  
Gemengeansatz 72  
Genauschmiedetechnik 117  
gerichtet 456  
Gesenkschmieden 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  
 Grobkorngüten 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  
 Gütwert, von Dauermagneten 576

**H**

Haftung 199  
 Haftvermittler 191, 198, 330  
 Halbleiter 508, 522–525, 527, 536, 539  
 –, Eigen- 522  
 –, Sperrsicht- 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  
Handlaminieren 307 f.  
Harnstoffharz 304  
Härtbarkeit 171, 240, 244, 248  
Hartbearbeitung 134  
Hartchrom 342  
Härte 357, 360  
Härteten 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  
Härteschrumpfung 305  
Härtespannung 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  
Hartzerspanung 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  
Hochleistungszerstäuben 214  
Hochofen 26 f.  
Hochspannungstechnik 554  
Höchstdruckspritzen 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  
Kaltaushärtten 198, 235  
Kaltgasspritzen 209  
kalthärtend 195  
Kaltkammerverfahren 84  
Kaltleiter 541  
Kaltpressschweißen 139, 163  
Kaltriss 168  
Kaltschweißen 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.  
Kathodenerstäuben 212 ff.  
kathodische Spannungsrißkorrosion 35  
kathodisches Reinigen 34  
Kautschuksorten, synthetische 310  
Keimbildner 63, 98  
Keimbildung 98  
-, heterogene 98  
Keimdichte 97  
Keimzustand 97  
Keramik 360  
-,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 560  
-,  $\text{AlN}$ - 560  
-,  $\text{BeO}$ - 560  
-, PZT- 584  
-, schwarze 431  
-, weiße 431  
Keramiklager 415  
Keramikventil 468

keramische Gleitringdichtung 423  
keramische Verstärkungsfaser 397  
keramischer Lagerwerkstoff 422  
Kerbe 259 f., 367  
Kerbschlagzähigkeit 31  
kerbwirkungsbedingt 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  
Kolkennzahl 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  
Korngrenzgleiten 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  
 Kühlshmiermittel 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, CO<sub>2</sub>-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- $\alpha$ - 452  
 –, Ni- 452, 454–457  
 –, ODS- 105, 453  
 –, Pb- 417  
 –, Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 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  
Lötfülligkeit 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  
Martensithärtung 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 verschiedenartiger 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- $\alpha$ -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  
 –,  $\alpha''$ - 268  
 –,  $\gamma'$ - 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  
Panzer 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 Schwingen 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

Risschließeffekt 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) Elektrodentyp 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  
Schamstoff 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  
Schmelzschniden 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  
–, nichttoxische 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  
Schülpfen 80  
Schutz, gegen Korrosion 199  
–, gegen Verzunderung 199  
Schutzgas 140, 151, 182  
Schutzgasatmosphäre 228  
Schutzgasschirm 141  
Schutzgasschweißen 147–151  
Schwabbeln 127  
Schwächung, Röntgen- und  $\gamma$ -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  
Schweißeigenspannung 169  
Schweißeignung 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<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 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  
Spannungsgamglühen 173 f., 205, 229 f.  
Spannungsgarmtempern 317  
Spannungsdurchschlag, thermischer 556  
Spannungslunker 94  
Spannungsreihe 336  
Spannungsrißbildung 374  
Spannungsrißempfindlichkeit 317  
Spannungsrißkorrosion 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  
 Sperrsicht-Effekt 539  
 Sperrsicht-Halbleiter 539  
 spezifische Festigkeit 366, 402  
 spezifischer E-Modul 366  
 Spinell 66  
 Spinellgitter 575  
 Spongiosa 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  
 –, hochstfester 388, 406, 446, 448  
 –, hochstickstoffhaltiger 494  
 –, kaltzäher 489  
 –, korrosionsbeständiger 175, 492  
 –, legierter 243 f.  
 –, martensitaushärtender 446 ff.  
 –, martensitischer 174, 493  
 –, Mehrphasen- 463 f.  
 –, mikrolegierter 255, 463  
 –, niedriglegierter 349  
 –, rosträger 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  
Stofffleichtbau 384  
Stoffmagnetismus 564  
Störstellenhalbleitung 523  
Strahlen 200  
Strahlenbelastung 462  
Strangauflistung 292  
Stranggießen 41 f.  
Strangguss 25, 30  
Strangpressen 26, 108, 117 f., 319, 323  
Streckenenergie 172  
Streckgrenzenverhältnis 414  
Streckziehen 114, 119 f., 301  
Streufeld 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 Härteln 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  
 Tockenzerpanung 431  
 Ton 65  
 Tonerde 36  
 Tommineral 321  
 Tonsubstanz 64 f.  
 Topfzeit 198, 218  
 Torsion 257 f.  
 Trägergas 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,  $\alpha/\gamma$  166  
 unberuhigte Erstarrung 42  
 Ungänzen 168  
 unlegierter Stahl 274  
 Unterdruckaufkohlung 266

untere Bainitstufe 251  
unttereutektische Legierung 278  
unttereutektischer 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  
Vakuumumschmelzen 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  
Verdichterschaufel 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  
 Volumenschrumpfung 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  
 Warmauhärten 198, 235  
 Warmbadhärten 227, 247, 264  
 Wärmebehandlung 224  
 – von Werkzeugstahl 425  
 Wärmedämmsschicht 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  
 Weissscher 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

Zementiteinformung 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.  
ZrO<sub>2</sub>-Sonde 265  
Zugdruck-Umformen 114  
Zugeigenspannungen 169  
Zugspannung 437  
zunderbeständiger Werkstoff 349 f.  
Zunderbeständigkeit 487  
Zunderverlust 116  
Zündkerze 324  
Zusatzerkstoff 164  
Zweikomponenten-Klebstoff 195  
Zwischenabkühlung 175  
Zyanidelektrolyt 205  
Zyklenreihenfolge 372  
Zylinderkopf 468  
Zylinderlaufbuchse 467