

Wolfgang Bergmann  
Christoph Leyens

# Werkstofftechnik 2

## Anwendung



5., aktualisierte Auflage

HANSER





**bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Wolfgang Bergmann  
Christoph Leyens

# Werkstofftechnik 2

Anwendung

5., aktualisierte Auflage

HANSER

## Die Autoren:

Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Bergmann, ehemals TU Berlin

Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens, Institut für Werkstoffwissenschaft, TU Dresden;

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en), Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en), Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2021 Carl Hanser Verlag München

Internet: [www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Anne Kurth

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Titelbild: © shutterstock.com/fokke baarssen, Suwin und Nieuwland Photography

Satz: Dr. Naake, Brand-Erbisdorf

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

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

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

## Vorwort

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# Inhaltsverzeichnis

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

<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	Schutzgasschweißen .....	147
1.8.2.4	Schmelzschweißen mit Strahlen hoher Energiedichte .....	151
1.8.2.5	Sonstige Schmelzschweißverfahren .....	157
1.8.3	Pressschweißen .....	159
1.8.3.1	Widerstandspressschweißen .....	159
1.8.3.2	Diffusionsschweißen .....	160
1.8.3.3	Reib-, Reibrühr- und Ultraschallschweißen .....	161
1.8.3.4	Kaltpressschweißen .....	163
1.8.4	Schweißbarkeit technisch wichtiger Werkstoffe .....	163
1.8.4.1	Gefügeausbildung im Schweißnahtbereich .....	163
1.8.4.2	Gefügeausbildung in der Wärmeeinflusszone (WEZ) .....	164
1.8.4.3	Schweißfehler .....	166

1.8.4.4	Schweißspannungen	169
1.8.4.5	Probleme beim Schmelzschiessen von Eisenwerkstoffen	171
1.8.4.6	Probleme beim Schmelzschiessen von Nichteisenmetallen	179
1.8.4.7	Probleme beim Schmelzschiessen verschiedenartiger Metalle	183
1.8.4.8	Schweißbarkeit	183
<b>1.9</b>	<b>Löten</b>	<b>184</b>
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>	<b>189</b>
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>	<b>199</b>
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>	<b>224</b>
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> . . . . .	348
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> . . . . .	355
1.3.1	Verschleißsystem . . . . .	355
1.3.2	Verschleißmechanismen . . . . .	356
1.3.2.1	Adhäsionsverschleiß . . . . .	356
1.3.2.2	Abrasionsverschleiß . . . . .	357
1.3.2.3	Ermüdungverschleiß . . . . .	358
1.3.2.4	Tribochemischer Verschleiß . . . . .	358
1.3.3	Verschleißverhalten . . . . .	359
1.3.3.1	Metalle . . . . .	359
1.3.3.2	Nichtmetalle . . . . .	360
1.3.4	Verschleißschutz . . . . .	361
1.3.4.1	Wahl geeigneter Werkstoffe . . . . .	361
1.3.4.2	Beschichtungen . . . . .	362
1.3.4.3	Schmiermittel . . . . .	363
<b>2</b>	<b>Leichtbau</b> . . . . .	365
<b>2.1</b>	<b>Gewichtsminderung und Betriebssicherheit</b> . . . . .	365
<b>2.2</b>	<b>Betriebsfestigkeit</b> . . . . .	368
<b>2.3</b>	<b>Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung</b> . . . . .	375
2.3.1	Fehler an der Werkstückoberfläche . . . . .	375
2.3.1.1	Eindringverfahren . . . . .	375
2.3.1.2	Magnetpulverprüfung . . . . .	376
2.3.2	Fehler im Werkstückinnern . . . . .	377
2.3.2.1	Durchstrahlungsprüfung mit Röntgen- und Gammastrahlen (Radiographie) . . . . .	377
2.3.2.2	Ultraschallprüfung . . . . .	379
2.3.2.3	Magnetinduktive Prüfverfahren . . . . .	383
<b>2.4</b>	<b>Leichtbauweisen</b> . . . . .	384
2.4.1	Stoffleichtbau . . . . .	384
2.4.2	Formleichtbau . . . . .	385
<b>3</b>	<b>Leichtbauwerkstoffe</b> . . . . .	388
<b>3.1</b>	<b>Verbundwerkstoffe</b> . . . . .	388
3.1.1	Prinzip der Faserverstärkung . . . . .	389
3.1.2	Verbundwerkstoffe mit Polymermatrix (PMC) . . . . .	391

3.1.3	Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix (MMC) . . . . .	395
3.1.4	Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (CMC) . . . . .	398
<b>3.2</b>	<b>Leichtmetalle</b> . . . . .	<b>400</b>
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> . . . . .	<b>403</b>
<b>4.1</b>	<b>Bauteile</b> . . . . .	<b>403</b>
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> . . . . .	<b>413</b>
<b>4.3</b>	<b>Verschraubungen</b> . . . . .	<b>414</b>
<b>4.4</b>	<b>Lager</b> . . . . .	<b>414</b>
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> . . . . .	<b>422</b>
<b>4.6</b>	<b>Dichtungen</b> . . . . .	<b>422</b>
<b>5</b>	<b>Werkstoffe in der Fertigungstechnik</b> . . . . .	<b>424</b>
<b>5.1</b>	<b>Werkzeugstähle</b> . . . . .	<b>424</b>
<b>5.2</b>	<b>Schneidstoffe</b> . . . . .	<b>427</b>
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> . . . . .	<b>436</b>
<b>6.1</b>	<b>Werkstoffe in der Luft- und Raumfahrt</b> . . . . .	<b>436</b>
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>	<b>552</b>
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>	<b>564</b>
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>	<b>579</b>
8.4.1	Kondensatorwerkstoffe	579
8.4.2	Ferroelektrika	581
8.4.3	Piezoelektrizität, Pyroelektrizität	583
<b>H</b>	<b>Tabellenanhang</b>	
<b>1</b>	<b>Metallische Werkstoffe</b>	<b>585</b>
<b>2</b>	<b>Polymerwerkstoffe</b>	<b>599</b>
<b>3</b>	<b>Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe</b>	<b>603</b>
<b>4</b>	<b>Werkstoffe der Elektrotechnik</b>	<b>606</b>
	<b>Quellenverzeichnis und weiterführende Literatur</b>	<b>612</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>632</b>

# 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 Auftriebswirkung nach oben getragen. An der Oberfläche wird ein mit Erz um einen Faktor bis 10 angereicherter Schaum abgezogen.

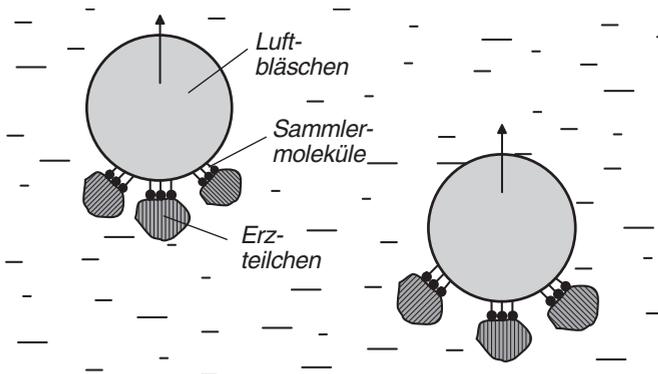


Abb. E.1-1 Erzreicherung durch Flotation (nach Lit. E.8)

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

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

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

## 1.1.2 Herstellung des Rohmetalls

### 1.1.2.1 Pyrometallurgie

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

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

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

Wichtig für das metallurgische Verhalten einer Schlacke ist deren **Basizität**. Der basische oder saure Charakter einer Schlacke richtet sich nach der Art und Menge der in ihr enthaltenen Oxide. Oxide von Metallen wie CaO oder MgO ergeben als Basenanhydride ein basisches Verhalten, Oxide von Nichtmetallen wie SiO<sub>2</sub> oder P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> führen als Säureanhydride 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.

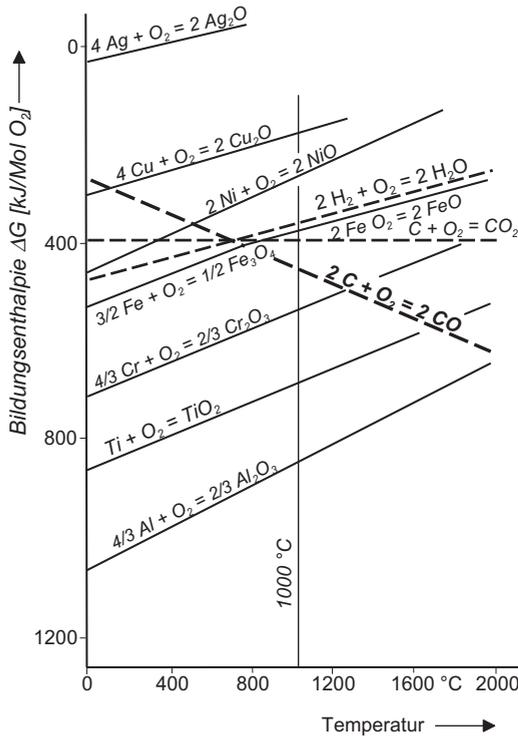


Abb. E.1-2 Bildungsenthalpien von Metall/Metalloxid-Reaktionen in Abhängigkeit von der Temperatur (Richardson-Ellingham-Diagramm, nach Lit. E.9)

Je größer die Bildungsenthalpie einer Metall/Metalloxid-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  $\text{Cu}_2\text{S}$  und Eisensulfid  $\text{FeS}$  als Kupferstein. Das Steinschmelzen stellt also nur den ersten pyrometallurgischen Verhüttungsschritt sulfidischer Kupfer- und Nickelerze dar. Es zielt auf eine Entfernung der Gangart und der beim Rösten von unerwünschten Begleitelementen gebildeten Oxide durch Schlackenbildung ab.

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

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

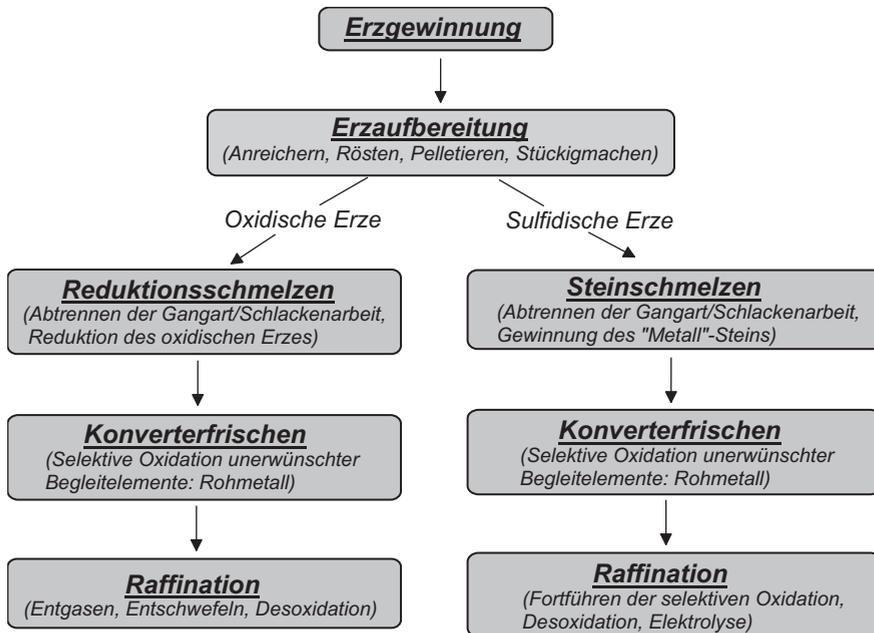


Abb. E.1-3 Verfahrensschritte der pyrometallurgischen Metallgewinnung (schematisch)

### 1.1.2.2 Hydrometallurgie

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

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

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

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

### 1.1.2.3 Schmelzflusselektrolyse

Sehr unedle Metalle können aus wässrigen Elektrolyten nicht abgeschieden werden. Bei den erforderlichen Potenzialen käme es hauptsächlich zu einer Zersetzung des Wassers. Daher müssten eigentlich ihre geschmolzenen Metallverbindungen elektrolytisch getrennt werden. Dies stößt wegen der allgemein hohen Schmelztemperaturen, z. B. der Metalloxide, auf beträchtliche Schwierigkeiten. Als Ausweg bietet sich eine Lösung der Metallverbindung in einem niedriger schmelzenden, wasserfreien Elektrolyten an. Bei der Herstellung von Aluminium dient das geschmolzene Mineral *Kryolith*  $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$  als Lösungsmittel für Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . 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- (Vakuumentgasen, Inertgasspülen) oder Temperaturänderung (Ausscheiden, Zonenschmelzen, Destillieren), vor allem aber auch dadurch erfolgen, dass der Schmelze – wie schon beim Frischen – Stoffe zugesetzt werden, die eine höhere Affinität zum verunreinigenden Element besitzen als das Metall und in der Schmelze unlösliche Reaktionsprodukte bilden. Die unlöslichen Reaktionsprodukte

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

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

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

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

### 1.1.3.2 Legieren

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

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

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

#### 1.1.4 Gießen und Verformen

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

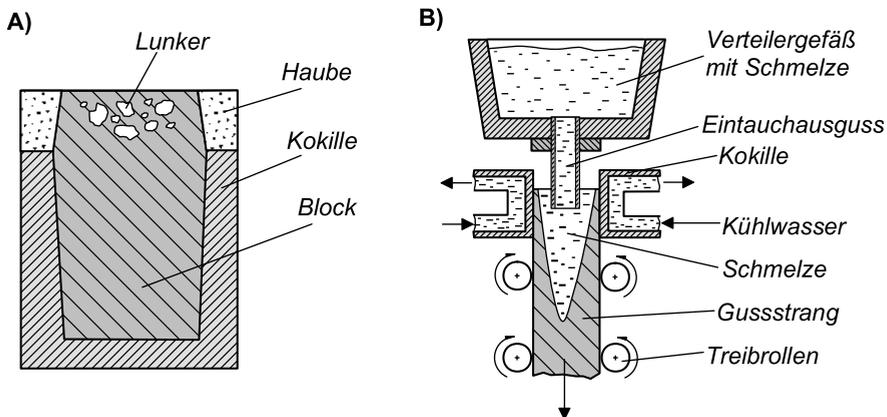


Abb. E.1-4 Rohguss; A) Blockguss, B) Strangguss

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

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

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

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

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

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

## 1.2 Eisen und Stahl

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

## 1.2.1 Herstellung von Eisen

### 1.2.1.1 Hochofenverfahren

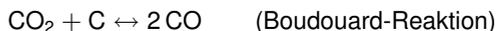
Die Hauptreaktion des Hochofenprozesses besteht in der *Reduktion von Eisenerz* mit Hilfe von Kohlenmonoxid zu einer stark verunreinigten und kohlenstoffreichen Eisenschmelze, dem *Roheisen*. Die wichtigsten eisenhaltigen Minerale in Eisenerzen sind die Oxide Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und Magnetit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

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 CaO/SiO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Abspaltung zu Oxiden. Mit dem „gebrannten“ Kalk CaO wird ein großer Teil des vorwiegend mit Koks eingeschleppten *Schwefels* als CaS abgebunden und verschlackt, eine vollständige bzw. ausreichende *Entschwefelung* im Hochofen ist jedoch aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich, so dass dem Entschwefelungsproblem auch außerhalb des Hochofens noch eine erhebliche Bedeutung zukommt.

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

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

Für die Vorgänge im Hochofen ist das so genannte *Boudouard-Gleichgewicht* zwischen C, CO und CO<sub>2</sub> bestimmend. Gemäß der Reaktion



wird das bei der Reduktion von Eisenoxid durch CO entstandene CO<sub>2</sub> durch Reaktion mit Kohlenstoff wieder zu CO zurückgebildet und steht für eine Reduktion erneut zur Verfügung.

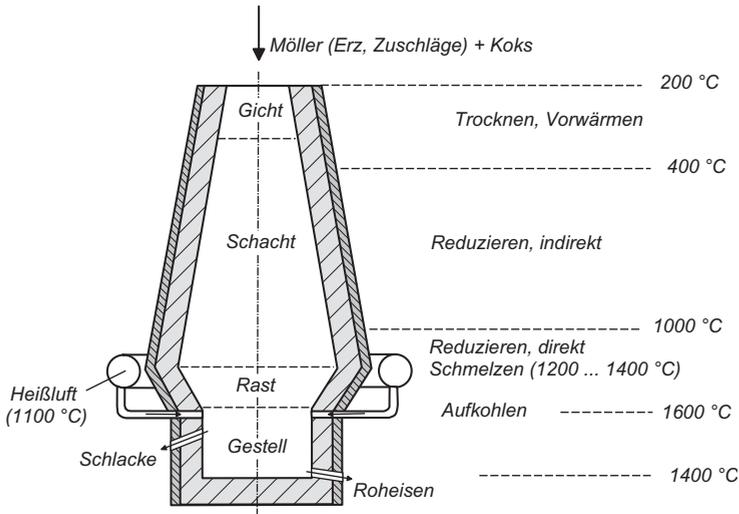


Abb. E.1-5 Hochofen

Dem in Abbildung E.1-6 dargestellten Diagramm ist zu entnehmen, dass das Gleichgewicht oberhalb von etwa 1000 °C ganz auf der rechten Seite, also auf der CO-Seite, und unterhalb etwa 450 °C ganz auf der linken Seite, also bei 100 % 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.

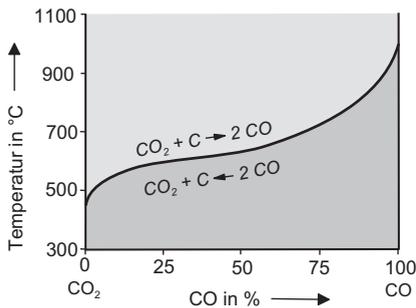


Abb. E.1-6 Boudouard-Gleichgewicht

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.