

# Inhaltsverzeichnis

## F Werkstoffherstellung

<b>1</b>	<b>Herstellung von Metallen</b>	3
1.1	Metallurgische Verfahren	3
1.1.1	Erzaufbereitung	3
1.1.2	Herstellung des Rohmetalls	4
1.1.2.1	Pyrometallurgie	4
1.1.2.2	Hydrometallurgie	7
1.1.2.3	Schmelzflußelektrolyse	8
1.1.3	Herstellung des Gebrauchsmetalls	8
1.1.3.1	Raffination des Rohmetalls	8
1.1.3.2	Legieren	9
1.1.4	Gießen und Verformen	10
1.2	Eisen und Stahl	11
1.2.1	Herstellung von Eisen	11
1.2.1.1	Hochofenverfahren	11
1.2.1.2	Direktreduktions- und Schmelzreduktions-Verfahren	14
1.2.2	Herstellung von Stahl	15
1.2.2.1	Unerwünschte Begleitelemente	16
1.2.2.2	Konverterverfahren	22
1.2.2.3	Elektrostahlverfahren	24
1.2.2.4	Nachbehandlungsverfahren	26
1.3	Aluminium	31
<b>2</b>	<b>Herstellung von Kunststoffen</b>	33
2.1	Technische Durchführung von Polyreaktionen	33
2.2	Chemischer Ablauf von Polyreaktionen	35
2.2.1	Polymerisation	35
2.2.1.1	Radikalische Polymerisation	36
2.2.1.2	Ionische Polymerisation	37
2.2.1.3	Katalytisch-koordinative Polymerisation	38
2.2.2	Polykondensation	39
2.2.3	Polyaddition	40
2.3	Aufbereitung des polymeren Rohstoffs zum polymeren Werkstoff	42
<b>3</b>	<b>Herstellung nichtmetallisch-anorganischer Werkstoffe</b>	43
3.1	Keramik	43
3.1.1	Silicatkeramik	43
3.1.2	Oxidkeramik	45
3.1.3	Nichtoxidkeramik	45
3.2	Glas	46
3.2.1	Rohstoffe und Gemengeansatz	46
3.2.2	Schmelzen	47

3.2.3	Homogenisieren und Läutern	48
3.2.4	Herstellungsbedingte Glasfehler	48
	Weiterführende Literatur	49

## G Werkstoffverarbeitung

<b>1</b>	<b>Metallische Werkstoffe</b>	53
1.1	Gießen	54
1.1.1	Gießverfahren	54
1.1.1.1	Sandguß	56
1.1.1.2	Formmaskenguß	58
1.1.1.3	Ausschmelzverfahren	58
1.1.1.4	Kokillenguß	59
1.1.1.5	Druckguß	60
1.1.1.6	Schleuderguß	61
1.1.2	Vorgänge bei der Erstarrung reiner Metalle	61
1.1.2.1	Lunkerbildung	62
1.1.2.2	Porenbildung	64
1.1.3	Vorgänge bei der Erstarrung von Legierungen	65
1.1.3.1	Seigerung	65
1.1.3.2	Konstitutionelle Unterkühlung	68
1.1.3.3	Warmrisse	70
1.1.4	Erstarrungsmorphologie	71
1.1.5	Gießbarkeit	72
1.1.6	Möglichkeiten zur Beeinflussung des Erstarrungsgefüges	74
1.1.7	Vergleich Gußgefüge/Verformungsgefüge	75
1.2	Galvanoformen	76
1.3	Pulvermetallurgie	77
1.3.1	Technische Durchführung pulvermetallurgischer Prozesse	78
1.3.1.1	Pulverherstellung und -aufbereitung	78
1.3.1.2	Formgebung	80
1.3.1.3	Sintern	83
1.3.1.4	Nachbehandlungen	84
1.3.2	Mechanische Eigenschaften gesinterter Bauteile	84
1.4	Umformen	85
1.4.1	Eigenschafts- und Gefügeänderungen	85
1.4.2	Verfahrensparameter	86
1.4.3	Reibung und Schmierung	87
1.4.4	Umformverfahren	88
1.4.4.1	Walzen	88
1.4.4.2	Schmieden	90
1.4.4.3	Strangpressen	92
1.4.4.4	Fließpressen	93
1.4.4.5	Tiefziehen	94
1.4.5	Umformbarkeit	95
1.4.5.1	Kenngößen	95
1.4.5.2	Umformverhalten metallischer Werkstoffe	97
1.5	Zerspanen	100
1.5.1	Verfahren	100

1.5.2	Versagen des Schneidwerkzeuges	103
1.5.2.1	Versagen durch Überbeanspruchung	103
1.5.2.2	Versagen durch Verschleiß	103
1.5.2.3	Verschleißminderung durch Kühl- und Schmiermittel	105
1.5.3	Schneidstoffe	106
1.5.3.1	Schnellarbeitsstähle	106
1.5.3.2	Hartmetalle	107
1.5.3.3	Oxidische Schneidkeramik	109
1.5.3.4	Nichtoxidische Schneidkeramik	110
1.5.3.5	Schleifmittel	112
1.5.4	Zerspanbarkeit	113
1.5.4.1	Beurteilungskriterien und Einflußgrößen	113
1.5.4.2	Zerspanungsverhalten einphasiger Metalle	114
1.5.4.3	Zerspanungsverhalten zwei- bzw. mehrphasiger Metalle	115
1.5.4.4	Automatenlegierungen	115
1.6	Erodieren	116
1.7	Thermisches Trennen	117
1.8	Schweißen	119
1.8.1	Grundvorgang des Fügens	119
1.8.2	Schmelzschweißen	122
1.8.2.1	Lichtbogenhandschweißen	122
1.8.2.2	Unterpulver- und Elektroschlackeschweißen	126
1.8.2.3	Schutzgasschweißen	129
1.8.2.4	Schmelzschweißen mit Strahlen hoher Energiedichte	132
1.8.2.5	Sonstige Schmelzschweißverfahren	138
1.8.3	Preßschweißen	140
1.8.3.1	Widerstandspreßschweißen	140
1.8.3.2	Diffusionsschweißen	142
1.8.3.3	Reib- und Ultraschallschweißen	142
1.8.3.4	Kaltpreßschweißen	144
1.8.4	Verhalten technisch wichtiger Werkstoffe beim Schmelzschweißen	144
1.8.4.1	Gefügeausbildung im Schweißnahtbereich	145
1.8.4.2	Gefügeausbildung in der Wärmeeinflußzone (WEZ)	146
1.8.4.3	Schweißfehler	147
1.8.4.4	Schweißspannungen	151
1.8.4.5	Probleme beim Schmelzschweißen von Eisenwerkstoffen	152
1.8.4.6	Probleme beim Schmelzschweißen von Nichteisenmetallen	161
1.8.4.7	Probleme beim Schmelzschweißen verschiedenartiger Metalle	164
1.8.4.8	Schweißbarkeit	165
1.9	Löten	165
1.9.1	Prinzipieller Vorgang und technische Durchführung	165
1.9.2	Weißlöten	168
1.9.3	Hartlöten	168
1.9.4	Lötbarkeit	169
1.10	Kleben	170
1.10.1	Klebvorgang sowie Vor- und Nachteile des Klebens	170
1.10.2	Ursachen der Adhäsion	171
1.10.3	Festigkeitsverhalten von Klebverbindungen	173
1.10.4	Klebstoffe für konstruktive Anwendungen	175
1.10.4.1	Phenolharz-Klebstoffe	176

1.10.4.2	Epoxidharz-Klebstoffe	177
1.10.4.3	Polyurethan-Klebstoffe	177
1.10.4.4	Acrylharz-Klebstoffe	177
1.10.4.5	Klebstoffe für erhöhte Temperaturen	178
1.10.5	Technische Durchführung von Klebungen	178
1.11	Beschichten	180
1.11.1	Reinigende Vorbehandlungen	181
1.11.2	Beschichten mit metallischen Überzügen	182
1.11.2.1	Schmelztauchen	182
1.11.2.2	Galvanisieren	183
1.11.2.3	Thermisches Spritzen	189
1.11.2.4	Plattieren	190
1.11.2.5	Diffusions- und Umschmelzlegieren	192
1.11.2.6	Abscheiden aus der Dampfphase (PVD, CVD)	193
1.11.3	Beschichten mit organischen Überzügen	198
1.11.3.1	Anstriche	198
1.11.3.2	Pulverbeschichtungen	202
1.11.4	Beschichten mit anorganischen Überzügen	203
1.11.4.1	Konversionsschichten	203
1.11.4.2	Oxidschichten	204
1.11.4.3	Emaillieren	205
1.12	Wärmebehandlung	206
1.12.1	Technische Durchführung von Wärmebehandlungen	207
1.12.2	Allgemeine Verfahren zur Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe	212
1.12.2.1	Spannungsarmglühen	212
1.12.2.2	Homogenglühen	213
1.12.2.3	Weichglühen	214
1.12.2.4	Aushärten	215
1.12.2.5	Dispersionshärten	218
1.12.3	Spezielle Verfahren zur durchgreifenden Wärmebehandlung von Stahl	219
1.12.3.1	Normalglühen	220
1.12.3.2	Härten	222
1.12.3.3	Vergüten	231
1.12.3.4	Isothermes Umwandeln in der Bainitstufe	233
1.12.3.5	Weichglühen	234
1.12.3.6	Glühen auf verbesserte Zerspanbarkeit	236
1.12.3.7	Thermomechanische Behandlungen	237
1.12.4	Verfahren zur Verfestigung der Randschicht von Stahlteilen	239
1.12.4.1	Wirkung einer Randschichtverfestigung auf das mechanische Verhalten von Bauteilen	240
1.12.4.2	Flamm- und Induktionshärten	241
1.12.4.3	Einsatzhärten	244
1.12.4.4	Nitrieren	251
1.12.4.5	Borieren	258
<b>2</b>	<b>Kunststoffe</b>	<b>260</b>
2.1	Verarbeitungseigenschaften	260
2.1.1	Unvernetzte Polymere	260
2.1.2	Vernetzte Polymere	263
2.2	Spanlose Formgebung thermoplastischer Kunststoffe	265
2.2.1	Urformen	265

2.2.1.1	Gießen	265
2.2.1.2	Extrudieren	265
2.2.1.3	Spritzgießen	268
2.2.1.4	Kalandrieren	271
2.2.1.5	Sintern	272
2.2.1.6	Schäumen	273
2.2.2	Umformen	275
2.2.2.1	Blasen	275
2.2.2.2	Warmformen	276
2.2.2.3	Verstrecken	277
2.3	Spanlose Formgebung vernetzender Kunststoffe	278
2.3.1	Duroplaste	278
2.3.1.1	Gießen	278
2.3.1.2	Pressen	279
2.3.1.3	Verarbeitung faserverstärkter Duroplaste	281
2.3.2	Elastomere	285
2.4	Zerspanen	287
2.5	Fügen	288
2.5.1	Schweißen	288
2.5.2	Kleben	291
2.6	Beschichten	291
2.7	Thermische Nachbehandlungen	293
<b>3</b>	<b>Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe</b>	<b>294</b>
3.1	Keramik	294
3.1.1	Silicatkeramik	294
3.1.1.1	Formgebung	295
3.1.1.2	Trocknen	296
3.1.1.3	Brennen	297
3.1.1.4	Glasieren	298
3.1.2	Oxid- und Nichtoxidkeramik	299
3.1.2.1	Formgebung	299
3.1.2.2	Brennen	301
3.1.3	Kohlenstoffprodukte	301
3.1.3.1	Diamant	301
3.1.3.2	Kohlenstoff- und Graphitwerkstoffe	303
3.2	Glas	305
3.2.1	Formgebung	305
3.2.2	Nachbehandlungen	309
<b>4</b>	<b>Verarbeitungsbedingte Eigenschaftsänderungen</b>	<b>310</b>
	Weiterführende Literatur	312

## H Werkstoffschädigung

<b>1</b>	<b>Feuchte Korrosion von Metallen</b>	<b>317</b>
1.1	Erscheinungsformen der Korrosion	317
1.1.1	Gleichmäßige Korrosion	318

1.1.2	Lokalisierte Korrosionsangriff	318
1.1.2.1	Kontaktkorrosion	319
1.1.2.2	Selektive Korrosion	321
1.1.2.3	Interkristalline Korrosion	322
1.1.2.4	Spaltkorrosion	322
1.1.2.5	Lochfraßkorrosion	324
1.1.3	Mechanisch-korrosiver Angriff	326
1.1.3.1	Spannungsrißkorrosion	326
1.1.3.2	Schwingungsrißkorrosion	329
1.1.3.3	Erosions-, Kavitations-, Reibkorrosion	330
1.2	Einflußfaktoren	332
1.2.1	pH-Wert	332
1.2.2	Sauerstoffgehalt	333
1.2.3	Temperatur	334
1.2.4	Bewegungszustand	335
1.2.5	Salzgehalt	335
1.2.6	Korrosionsmedien	336
1.3	Korrosionsverhalten technisch wichtiger Metalle	338
1.3.1	Eisen und Eisenlegierungen	338
1.3.1.1	Unlegierte, niedriglegierte Stähle und Gußeisen	338
1.3.1.2	Korrosionsbeständige Stähle	340
1.3.2	Aluminium und Aluminiumlegierungen	343
1.3.3	Kupfer und Kupferlegierungen	345
1.3.3.1	Reinkupfer	345
1.3.3.2	Kupferlegierungen	346
1.3.4	Nickel und Nickellegierungen	348
1.3.5	Titan und Titanlegierungen	348
1.4	Korrosionsschutz	349
1.4.1	Grundsätzliche Möglichkeiten	349
1.4.2	Aktiver Korrosionsschutz	350
1.4.2.1	Werkstoffwahl	350
1.4.2.2	Kathodischer Korrosionsschutz	351
1.4.2.3	Inhibitoren	352
1.4.2.4	Konstruktive Maßnahmen	354
1.4.3	Passiver Korrosionsschutz	356
1.4.3.1	Metallische Überzüge	356
1.4.3.2	Anstriche	359
<b>2</b>	<b>Korrosion nichtmetallischer Werkstoffe</b>	<b>364</b>
2.1	Kunststoffe	364
2.1.1	Verhalten unter Witterungseinfluß (Alterung)	364
2.1.2	Verhalten gegenüber flüssigen Medien	365
2.2	Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe	366
<b>3</b>	<b>Werkstoffschädigung bei erhöhten Temperaturen</b>	<b>369</b>
3.1	Metallische Werkstoffe	369
3.1.1	Hochtemperaturkorrosion	369
3.1.1.1	Zundern	369
3.1.1.2	Heißgaskorrosion	372

3.1.1.3	Schutzmaßnahmen	374
3.1.2	Taupunktkorrosion (Niedertemperatur-Korrosion)	375
3.2	Thermische Zersetzung von Kunststoffen	375
<b>4</b>	<b>Verschleiß</b>	<b>377</b>
4.1	Grundlagen	377
4.1.1	Verschleißsystem	377
4.1.2	Verschleißmechanismen	378
4.1.2.1	Adhäsionsverschleiß	378
4.1.2.2	Abrasionsverschleiß	379
4.1.2.3	Ermüdungverschleiß	380
4.1.2.4	Tribochemischer Verschleiß	380
4.2	Verschleißverhalten	381
4.2.1	Metalle	381
4.2.2	Nichtmetalle	382
4.3	Verschleißschutz	383
4.3.1	Wahl geeigneter Werkstoffe	383
4.3.2	Beschichtungen	384
4.3.3	Schmiermittel	384
	Weiterführende Literatur	387

## **I Werkstoffanwendung**

<b>1</b>	<b>Metallische Werkstoffe</b>	<b>391</b>
1.1	Werkstoffe auf Fe-Basis	391
1.1.1	Stähle	391
1.1.1.1	Allgemeine Baustähle	391
1.1.1.2	Hochfeste, schweißbare Feinkornbaustähle	394
1.1.1.3	Vergütungsstähle	398
1.1.1.4	Einsatzstähle	401
1.1.1.5	Höchstfeste Stähle	401
1.1.1.6	Federstähle	403
1.1.1.7	Warmfeste Stähle	404
1.1.1.8	Kaltzähe Stähle	406
1.1.1.9	Korrosionsbeständige Stähle	407
1.1.1.10	Werkzeugstähle	409
1.1.1.11	Stahlguß	413
1.1.2	Gußeisen	414
1.1.2.1	Metastabile und stabile Phasenausbildung	414
1.1.2.2	Metastabile und stabile Gefügeausbildung	416
1.1.2.3	Technische Gußeisensorten	419
1.2	Werkstoffe auf NE-Basis	425
1.2.1	Al-Werkstoffe	425
1.2.1.1	Korrosionsbeständige Al-Legierungen	425
1.2.1.2	Aushärtbare Al-Legierungen	426
1.2.1.3	Al-Gußlegierungen	427
1.2.2	Cu-Werkstoffe	429
1.2.2.1	CuZn-Legierungen	430

1.2.2.2	CuSn-Legierungen	431
1.2.2.3	CuAl-Legierungen	431
1.2.2.4	CuNi-Legierungen	433
1.2.3	Ni-Werkstoffe	433
1.2.3.1	Heizleiterlegierungen	434
1.2.3.2	Korrosionsbeständige Legierungen	434
1.2.3.3	Hochwarmfeste Legierungen	435
1.2.3.4	Sonderanwendungen	439
1.2.4	Ti-Werkstoffe	440
<b>2</b>	<b>Polymerwerkstoffe</b>	<b>444</b>
2.1	Thermoplaste	444
2.1.1	Massenkunststoffe	445
2.1.1.1	Polyethylen (PE)	445
2.1.1.2	Polypropylen (PP)	448
2.1.1.3	Polyvinylchlorid (PVC)	448
2.1.1.4	Polystyrol (PS)	450
2.1.2	Thermoplastische Konstruktions-Kunststoffe	453
2.1.2.1	Polyamid (PA)	453
2.1.2.2	Polyoximethylen (POM)	456
2.1.2.3	Polyethylen- und -butylenterephthalat (PETP, PBTP)	458
2.1.3	Thermoplastische Kunststoffe mit speziellen Eigenschaften	458
2.1.3.1	Polymethylmethacrylat (PMMA)	458
2.1.3.2	Polycarbonat (PC)	459
2.1.3.3	Polytetrafluorethylen (PTFE)	460
2.1.4	Thermoplaste mit erhöhter Temperaturbeständigkeit	462
2.2	Duroplaste	466
2.2.1	Phenol- und Aminoharze (PF, UF, MF)	466
2.2.2	Ungesättigte Polyesterharze (UP)	469
2.2.3	Epoxidharze (EP)	470
2.3	Elastomere	472
2.3.1	Dien-Elastomere normaler Beständigkeit	473
2.3.2	Dien-Elastomere erhöhter Beständigkeit	475
2.3.3	Dienfreie Spezial-Elastomere	476
<b>3</b>	<b>Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe</b>	<b>479</b>
3.1	Keramische Werkstoffe	479
3.1.1	Silicatkeramische Werkstoffe	479
3.1.1.1	Ziegel	481
3.1.1.2	Steingut	481
3.1.1.3	Steinzeug	482
3.1.1.4	Porzellan	482
3.1.2	Oxidkeramik	484
3.1.2.1	Aluminiumoxid $Al_2O_3$	484
3.1.2.2	Zirkoniumdioxid $ZrO_2$	486
3.1.3	Nichtoxidkeramik	487
3.1.3.1	Siliziumcarbid $SiC$	488
3.1.3.2	Siliziumnitrid $Si_3N_4$	490
3.1.4	Kohlenstoff	493
3.1.4.1	Diamant	493



3.1.4.2	Kohlenstoff und Graphit . . . . .	494
3.1.5	Feuerfeste Werkstoffe (Steine) . . . . .	495
3.2	Gläser . . . . .	497
3.2.1	Technisch wichtige Glassorten . . . . .	497
3.2.2	Kalknatron-Gläser . . . . .	499
3.2.3	Borosilicat-Gläser . . . . .	499
3.2.4	Gläser mit speziellen optischen Eigenschaften . . . . .	500
3.2.4.1	Kristallglas . . . . .	500
3.2.4.2	Optische Gläser . . . . .	500
3.2.4.3	Gläser mit veränderter Strahlungsdurchlässigkeit . . . . .	502
3.2.4.4	Phototrope Gläser . . . . .	503
3.2.5	Gläser für elektrotechnische Anwendungen . . . . .	504
<b>4</b>	<b>Werkstoffe der Elektrotechnik</b> . . . . .	<b>506</b>
4.1	Werkstoffe mit Leit- bzw. Isolationsfunktion . . . . .	506
4.1.1	Leiterwerkstoffe . . . . .	506
4.1.2	Supraleiter . . . . .	507
4.1.3	Kontaktwerkstoffe . . . . .	508
4.1.4	Widerstandswerkstoffe . . . . .	511
4.1.5	Halbleiter . . . . .	513
4.1.5.1	Werkstoffe . . . . .	513
4.1.5.2	Herstellen von Halbleitereinkristallen . . . . .	515
4.1.5.3	Planartechnik . . . . .	520
4.1.5.4	Anwendungen . . . . .	525
4.1.6	Isolierstoffe . . . . .	534
4.1.6.1	Anorganische Isolierstoffe . . . . .	535
4.1.6.2	Organische Isolierstoffe . . . . .	537
4.1.6.3	Gasförmige und flüssige Isolierstoffe . . . . .	539
4.2	Werkstoffe mit magnetischer Funktion . . . . .	540
4.2.1	Weichmagnetische Werkstoffe . . . . .	540
4.2.2	Hartmagnetische Werkstoffe . . . . .	544
4.3	Werkstoffe mit dielektrischer Funktion . . . . .	546
<b>5</b>	<b>Verbundwerkstoffe</b> . . . . .	<b>548</b>
5.1	Leichtbau-Verbundwerkstoffe . . . . .	548
5.2	Hochtemperatur-Verbundwerkstoffe . . . . .	553
<b>6</b>	<b>Lagerwerkstoffe</b> . . . . .	<b>555</b>
6.1	Wälzlager . . . . .	555
6.2	Gleitlager . . . . .	555
6.2.1	Anforderungen . . . . .	555
6.2.2	Werkstoffe . . . . .	557
6.2.2.1	Metallische Lagerwerkstoffe . . . . .	557
6.2.2.2	Nichtmetallische Lagerwerkstoffe . . . . .	560
	Weiterführende Literatur . . . . .	562
	Stichwortverzeichnis . . . . .	565