
Taschenbuch der Werkstoffe

von
Dr.-Ing. Manfred Merkel und
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Thomas

5., neubearbeitete Auflage
mit 218 Bildern und 143 Tabellen



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag



1	Grundlagen der metallischen Stoffe	15
2	Eisenwerkstoffe	158
3	Nichteisenmetalle	293
4	Pulver- und Sinterwerkstoffe	398
5	Nichtmetallische Stoffe	451
6	Schmierstoffe	625
7	Korrosion – Korrosionsschutz	636
8	Zusammenstellung von Normen	656
9	Sachwortverzeichnis	670



Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der metallischen Stoffe	15
1.1	<i>Der kristalline Aufbau der Metalle und Legierungen</i>	15
1.1.1	Translationsgitter (<i>Bravais</i> -Gitter)	16
1.1.1.1	Bestimmung von Punkten, Ebenen und Richtungen im kubischen System	19
1.1.1.2	Bestimmung von Ebenen und Richtungen im hexagonalen System	26
1.1.2	Gitteraufbau der Metalle	30
1.1.2.1	Polymorphie	35
1.1.2.2	Anisotropie	37
1.1.3	Gitteraufbau der Legierungen	40
1.1.3.1	Kristallgemisch	42
1.1.3.2	Mischkristalle (Mk)	42
1.1.3.3	Überstrukturen	44
1.1.3.4	Intermetallische und intermediäre Phasen	45
1.1.3.5	Eigenschaftsänderungen der Metalle durch Legieren	49
1.1.4	Aufbau der Realkristalle	51
1.1.4.1	Strukturelle Fehlordnungen	52
1.1.4.1.1	Punktförmige oder nulldimensionale Fehlordnungen	53
1.1.4.1.2	Linienförmige oder eindimensionale Fehlordnungen	56
1.1.4.1.3	Flächenförmige oder zweidimensionale Fehlordnungen	67
1.1.5	Kristallbildung	70
1.2	<i>Formänderung und Rekristallisation</i>	75
1.2.1	Elastische Formänderung	76
1.2.2	Plastische Formänderung	79
1.2.3	Verfestigung	86
1.2.4	Kristallerholung und Rekristallisation	88
1.2.4.1	Kristallerholung	88
1.2.4.2	Rekristallisation	89
1.2.5	Formänderung in Abhängigkeit von der Zeit und der Temperatur	94
1.3	<i>Zustandsänderungen der Metalle und Legierungen</i>	97
1.3.1	Meßmethoden zur Bestimmung von Erstarrungs- bzw. Schmelzpunkten sowie des Umwandlungsverhaltens von Metallen und Legierungen im festen Zustand	98
1.3.2	Zustandsänderungen binärer Systeme	101
1.3.2.1	Zustandsschaubild eines binären Systems (<i>A–B</i>), dessen Komponenten im flüssigen und festen Zustand völlig löslich sind	102
1.3.2.2	Zustandsschaubild eines binären Systems (<i>Bi–Cd</i>), dessen Komponenten im flüssigen Zustand völlig löslich und im festen Zustand völlig unlöslich sind	106

1.3.2.3	Zustandsschaubild eines binären eutektischen Systems, dessen Komponenten im flüssigen Zustand völlig löslich und im festen Zustand begrenzt löslich sind	109
1.3.2.4	Zustandsschaubild eines binären Systems mit Peritektikum, dessen Komponenten im flüssigen Zustand völlig löslich und im festen Zustand begrenzt löslich sind	112
1.3.2.5	Zustandsschaubild eines binären Systems mit begrenzter Löslichkeit und eutektoider Phasenumwandlung im festen Zustand	114
1.3.2.6	Binäre Systeme mit begrenzter Löslichkeit im flüssigen und völliger Unlöslichkeit der Komponenten im festen Zustand	116
1.3.2.7	Überblick über die Grundtypen der Zustandsschaubilder binärer Systeme	117
1.3.3	Zustandsänderungen ternärer Systeme	118
1.3.3.1	Konzentrationsdreieck	118
1.3.3.2	Ternäre Zustandsschaubilder	123
1.3.4	Gibbssches Phasengesetz (Phasenregel)	127
1.4	<i>Diffusion in Metallen</i>	129
1.4.1	Diffusionsarten	130
1.4.1.1	Selbstdiffusion (Thermodiffusion)	130
1.4.1.2	Fremddiffusion (konzentrationsabhängige Diffusion)	130
1.4.2	Diffusionsgesetze	131
1.4.3	Spinodale	135
1.4.4	Einflüsse auf die Diffusion	137
1.4.5	Diffusionsmechanismen	138
1.4.6	Kirkendall-Effekt	139
1.5	<i>Elektrische Leitfähigkeit der Metalle</i>	140
1.6	<i>Amorphe Metalle</i>	151
1.6.1	Eigenschaften amorpher Metalle	153
1.6.2	Verwendung amorpher Metalle	155
1.7	<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i>	156
2	Eisenwerkstoffe	158
2.1	<i>Eigenschaften</i>	158
2.2	<i>Verwendung</i>	159
2.3	<i>Eisen-Legierungen</i>	159
2.3.1	Einfluß der Legierungsbestandteile auf die Existenzbereiche der allotropen Modifikationen des Eisens	162
2.3.2	System Eisen-Kohlenstoff	164
2.3.2.1	Metastabiles System Fe-Fe ₃ C (Eisen-Eisenkarbid)	165
2.3.2.2	Stabiles System Eisen-Graphit (Fe-C)	169
2.4	<i>Genormte Eisen-Legierungen</i>	171
2.4.1	Eisen-Knetlegierungen	171
2.4.1.1	Einteilung der Stähle	171
2.4.1.2	Stahlgruppen und Stahlmarken	177

2.4.2	Eisen-Gußlegierungen	206
2.4.2.1	Stahlguß	207
2.4.2.2	Temperguß	215
2.4.2.3	Hartguß	218
2.4.2.4	Gußeisen	219
2.5	Wärmebehandlung der Eisenwerkstoffe	228
2.5.1	Wärmebehandlung von Stahl	228
2.5.1.1	Thermische Verfahren der Wärmebehandlung des Stahls	231
2.5.1.1.1	Glühen	231
2.5.1.1.2	Härten	239
2.5.1.1.3	Anlassen	246
2.5.1.1.4	Härten nach Volumenerwärmung	251
2.5.1.1.5	Randschichthärten	257
2.5.1.2	Thermochemische Wärmebehandlung	260
2.5.1.3	Thermomechanische Verfahren	279
2.5.2	Wärmebehandlung von Gußeisen mit Lamellen- und Kugelgraphit	282
2.5.3	Wärmebehandlungsfehler	284
2.6	Stahl- und Gußfehler	286
2.7	Literatur- und Quellenverzeichnis	292
3	Nichteisenmetalle	293
3.1	Aluminium	293
3.1.1	Eigenschaften	293
3.1.2	Verwendung von unlegiertem Aluminium	297
3.1.3	Aluminium-Legierungen	300
3.1.3.1	Aluminium-Knetlegierungen	300
3.1.3.2	Al-Gußlegierungen	302
3.1.3.3	Wärmebehandlung von Al und Al-Legierungen	304
3.1.4	Literatur- und Quellenverzeichnis	310
3.2	Beryllium	310
3.2.1	Eigenschaften	310
3.2.2	Verwendung	312
3.2.3	Berylliumhaltige Legierungen	312
3.2.4	Literatur- und Quellenverzeichnis	314
3.3	Blei	314
3.3.1	Eigenschaften	314
3.3.2	Verwendung	315
3.3.3	Blei-Legierungen	316
3.3.4	Literatur- und Quellenverzeichnis	319
3.4	Chrom	320
3.4.1	Eigenschaften	320
3.4.2	Verwendung	320
3.4.3	Literatur- und Quellenverzeichnis	321
3.5	Gallium	321
3.5.1	Eigenschaften	321
3.5.2	Verwendung	322

3.5.3	Gallium-Legierungen	322
3.5.4	Literatur- und Quellenverzeichnis	324
3.6	<i>Germanium</i>	324
3.6.1	Eigenschaften	324
3.6.2	Verwendung	325
3.6.3	Literatur- und Quellenverzeichnis	325
3.7	<i>Gold</i>	325
3.7.1	Eigenschaften	325
3.7.2	Verwendung	326
3.7.3	Gold-Legierungen	327
3.7.4	Literatur- und Quellenverzeichnis	328
3.8	<i>Indium</i>	328
3.8.1	Eigenschaften	328
3.8.2	Verwendung	329
3.8.3	Indium-Legierungen	329
3.8.4	Intermetallische und intermediäre $A^{III}B^V$ -Verbindungen des Indiums	330
3.8.5	Literatur- und Quellenverzeichnis	331
3.9	<i>Kupfer</i>	332
3.9.1	Eigenschaften	332
3.9.2	Verwendung	334
3.9.3	Kupfer-Legierungen	335
3.9.4	Literatur- und Quellenverzeichnis	346
3.10	<i>Magnesium</i>	346
3.10.1	Eigenschaften	346
3.10.2	Verwendung	348
3.10.3	Magnesium-Legierungen	348
3.10.4	Literatur- und Quellenverzeichnis	350
3.11	<i>Nickel</i>	350
3.11.1	Eigenschaften	350
3.11.2	Verwendung	352
3.11.3	Nickel-Legierungen	353
3.11.4	Nickelhaltige Sonderwerkstoffe	354
3.11.5	Literatur- und Quellenverzeichnis	368
3.12	<i>Platinmetalle</i>	368
3.12.1	Eigenschaften	368
3.12.2	Verwendung	370
3.12.3	Literatur- und Quellenverzeichnis	372
3.13	<i>Quecksilber</i>	372
3.13.1	Eigenschaften	372
3.13.2	Verwendung	373
3.13.3	Literatur- und Quellenverzeichnis	373
3.14	<i>Silber</i>	374
3.14.1	Eigenschaften	374
3.14.2	Verwendung	374
3.14.3	Literatur- und Quellenverzeichnis	377

3.15	<i>Silizium</i>	377
3.15.1	Eigenschaften	377
3.15.2	Verwendung	378
3.15.3	Literatur- und Quellenverzeichnis	378
3.16	<i>Tantal</i>	378
3.16.1	Eigenschaften	378
3.16.2	Verwendung	380
3.16.3	Literatur- und Quellenverzeichnis	380
3.17	<i>Titan</i>	380
3.17.1	Eigenschaften	380
3.17.2	Verwendung	383
3.17.3	Titan-Legierungen	384
3.17.4	Literatur- und Quellenverzeichnis	387
3.18	<i>Wolfram</i>	388
3.18.1	Eigenschaften	388
3.18.2	Verwendung	389
3.18.3	Literatur- und Quellenverzeichnis	391
3.19	<i>Zink</i>	392
3.19.1	Eigenschaften	392
3.19.2	Verwendung	393
3.19.3	Zink-Legierungen	394
3.19.4	Literatur- und Quellenverzeichnis	396
3.20	<i>Zinn</i>	396
3.20.1	Eigenschaften	396
3.20.2	Verwendung	397
3.20.3	Literatur- und Quellenverzeichnis	397
4	Pulver- und Sinterwerkstoffe	398
4.1	<i>Pulvergewinnung</i>	398
4.2	<i>Pulveraufbereitung</i>	403
4.3	<i>Mischen der Pulver</i>	403
4.4	<i>Herstellung von Formteilen</i>	405
4.5	<i>Sintern</i>	405
4.5.1	Festphasensintern einphasiger Pulver	406
4.5.2	Festphasensintern mehrphasiger Pulver	411
4.5.3	Temporäres Flüssigphasensintern	412
4.5.4	Permanentes Flüssigphasensintern	413
4.5.5	Nachbehandlung gesinterter Formteile	414
4.6	<i>Anwendung von Sinterwerkstoffen</i>	414
4.6.1	Filterwerkstoffe	415
4.6.2	Sinterlagerwerkstoffe	416
4.6.3	Friktionswerkstoffe	418
4.6.4	Gesinterte Eisenwerkstoffe	421
4.6.5	Sinter-Superlegierungen	424
4.6.6	Kontaktwerkstoffe	424
4.6.6.1	Einphasige Sinterkontaktwerkstoffe	427
4.6.6.2	Kontakt-Verbundwerkstoffe	429

4.6.7	Pulver- und Sintermagnetwerkstoffe	432
4.6.7.1	Sintereisenmagnete	433
4.6.7.2	Masseisenkerne	434
4.6.7.3	Ferritmagnete	434
4.6.7.4	Sinterhartmagnete auf der Basis von Al-Ni-Co	441
4.6.7.5	Hartmagnetische intermetallische Phasen der Selten- erd- und Übergangsmetalle	443
4.6.8	Hartmetalle	445
4.6.9	Nichtmetallische Hartstoffe	447
4.7	Literatur- und Quellenverzeichnis	450
5	Nichtmetallische Stoffe	451
5.1	Kunststoffe	451
5.1.1	Grundbegriffe der Synthesereaktionen zur Herstellung von Kunst- stoffen	451
5.1.2	Struktur und strukturabhängige Eigenschaften der Kunststoffe	456
5.1.2.1	Einfluß der Gestalt der Makromoleküle auf einige Eigenschaften der Kunststoffe	458
5.1.2.2	Amorphe, orientierte und partiell-kristalline Struktu- ren	459
5.1.2.3	Einige spezielle Eigenschaften und Verhaltensweisen der Kunststoffe	462
5.1.2.3.1	Thermisches Verhalten	462
5.1.2.3.2	Mechanische Eigenschaften	467
5.1.2.3.3	Lösungs- und Quellverhalten	471
5.1.2.3.4	Elektrische Eigenschaften	473
5.1.3	Polymerisate	479
5.1.3.1	Polyethylen (PE)	479
5.1.3.1.1	Eigenschaften	483
5.1.3.1.2	Verwendung	485
5.1.3.2	Polypropylen (PP)	486
5.1.3.2.1	Eigenschaften	486
5.1.3.2.2	Verwendung	487
5.1.3.3	Polybuten-1 (PB)	488
5.1.3.3.1	Eigenschaften	488
5.1.3.3.2	Verwendung	489
5.1.3.4	Polystyren (PS)	489
5.1.3.4.1	Eigenschaften	489
5.1.3.4.2	Verwendung	491
5.1.3.5	Polyvinylchlorid (PVC)	491
5.1.3.5.1	Eigenschaften	492
5.1.3.5.2	Verwendung	494
5.1.3.6	Polymethylmethacrylat (PMMA)	495
5.1.3.6.1	Eigenschaften	495
5.1.3.6.2	Verwendung	496
5.1.3.7	Polyhalogenolefine	496
5.1.3.7.1	Eigenschaften	497

5.1.3.7.2	Verwendung	498
5.1.3.8	Polyoximethylen (POM)	499
5.1.3.8.1	Eigenschaften	499
5.1.3.8.2	Verwendung	500
5.1.3.9	Polyisobutylen (PIB)	500
5.1.3.9.1	Eigenschaften	501
5.1.3.9.2	Verwendung	502
5.1.3.10	Polyvinylcarbazol (PVK)	502
5.1.3.10.1	Eigenschaften	502
5.1.3.10.2	Verwendung	503
5.1.3.11	Polyamide (PA)	503
5.1.3.11.1	Eigenschaften	504
5.1.3.11.2	Verwendung	506
5.1.4	Polykondensate	506
5.1.4.1	Phenolharze (PF)	507
5.1.4.1.1	Eigenschaften	507
5.1.4.1.2	Verwendung	509
5.1.4.2	Aminoplaste	511
5.1.4.2.1	Eigenschaften	511
5.1.4.2.2	Verwendung	513
5.1.4.3	Polyester	514
5.1.4.3.1	Eigenschaften	515
5.1.4.3.2	Verwendung	517
5.1.4.4	Polycarbonate (PC)	518
5.1.4.4.1	Eigenschaften	518
5.1.4.4.2	Verwendung	520
5.1.4.5	Polyimide (PI)	520
5.1.4.5.1	Eigenschaften	521
5.1.4.5.2	Verwendung	522
5.1.4.6	Silicone (SI)	522
5.1.4.6.1	Eigenschaften	523
5.1.4.6.2	Verwendung	524
5.1.5	Polyaddukte	524
5.1.5.1	Epoxidharze (EP)	524
5.1.5.1.1	Eigenschaften	527
5.1.5.1.2	Verwendung	528
5.1.5.2	Polyurethane (PUR)	529
5.1.5.2.1	Eigenschaften	530
5.1.5.2.2	Verwendung	532
5.1.6	Cellulosederivate	533
5.1.6.1	Eigenschaften	534
5.1.6.2	Verwendung	535
5.1.7	Identifizierung der Kunststoffe	535
5.1.8	Literatur- und Quellenverzeichnis	538
5.2	Holz – Werkstoffe aus Holz	539
5.2.1	Allgemeines	539

5.2.2	Aufbau des Holzes	543
5.2.3	Eigenschaften des Holzes	549
5.2.3.1	Allgemeines	549
5.2.3.2	Verhalten des Holzes gegenüber Feuchtigkeit (Holzfeuchte)	549
5.2.3.3	Dichte (Rohdichte, Reindichte, Raumdichtezahl)	552
5.2.3.4	Mechanisch-technologische Eigenschaften des Holzes	553
5.2.3.5	Sonstige Eigenschaften	556
5.2.4	Holznutzung und Holzverwertung	558
5.2.4.1	Allgemeines	558
5.2.4.2	Vollholz	560
5.2.4.3	Furniere und Lagenholz	563
5.2.4.4	Faserplatten	564
5.2.4.5	Spanplatten	566
5.2.4.6	Verbundplatten	567
5.2.4.7	Verwendung des Holzes als Faserholz und als Brennholz	568
5.2.4.8	Fehler und Schädigungen des Holzes	570
5.2.4.9	Holzschutz	572
5.2.5	Literatur- und Quellenverzeichnis	573
5.3	<i>Mineralische Werkstoffe</i>	573
5.3.1	Naturgesteine und natürliche Gesteinsstoffe	574
5.3.1.1	Begriffe	574
5.3.1.2	Einteilung der Gesteine nach ihrer Entstehung	574
5.3.1.3	Makrostruktur der Gesteine	575
5.3.1.4	Kenngößen und Eigenschaften	576
5.3.1.5	Verwendung der Gesteine und Gesteinsstoffe	579
5.3.2	Mörtel und Betone	579
5.3.2.1	Eigenschaften der Mörtel und Betone	581
5.3.2.2	Verwendung der Mörtel und Betone	586
5.3.3	Mineralische Bindemittel	589
5.3.3.1	Begriffe	589
5.3.3.2	Einteilung der mineralischen Bindemittel	590
5.3.3.3	Kennzeichnende Reaktionen der Bildung und Erhärtung von Bindemitteln	590
5.3.3.4	Charakterisierung wichtiger Bindemittel	592
5.3.4	Keramische Werkstoffe	598
5.3.4.1	Allgemeines	598
5.3.4.2	Einteilung der keramischen Erzeugnisse	599
5.3.4.3	Eigenschaften keramischer Werkstoffe	599
5.3.4.4	Auswahl von wichtigen keramischen Werkstoffen	603
5.3.5	Technisches Glas	613
5.3.5.1	Definitionen – Strukturbeschreibung	613
5.3.5.2	Eigenschaften der Gläser	615
5.3.5.3	Einteilung der Gläser und ihre Verwendung	618
5.3.5.4	Glaserzeugung und Glasverarbeitung	621

5.3.5.5	Entwicklungstendenzen bei Glas	623
5.3.6	Literatur- und Quellenverzeichnis	624
6	Schmierstoffe	625
6.1	Einführung	625
6.1.1	Ursachen von Reibung und Verschleiß	625
6.1.2	Allgemeine Anforderungen an Schmierstoffe	626
6.1.3	Einteilung der Schmierstoffe	626
6.2	Flüssige Schmierstoffe	627
6.2.1	Übersicht	627
6.2.2	Verhaltenscharakteristik der flüssigen Schmierstoffe	627
6.2.3	Ausgewählte flüssige Schmierstoffe	628
6.3	Schmierfette	629
6.3.1	Übersicht	629
6.3.2	Verhaltenscharakteristik der Schmierfette	630
6.3.3	Ausgewählte Schmierfette	630
6.4	Festschmierstoffe	632
6.4.1	Übersicht	632
6.4.2	Verhaltenscharakteristik der festen Schmierstoffe	632
6.4.3	Ausgewählte Festschmierstoffe	633
6.4.3.1	Anorganische Stoffe mit Schichtgitterstruktur	633
6.4.3.2	Metallfilme	634
6.4.3.3	Chemische Oberflächenschichten (Umwandlungs- überzüge)	634
6.4.3.4	Kunststoffe	634
6.5	Literatur- und Quellenverzeichnis	635
7	Korrosion – Korrosionsschutz	636
7.1	Allgemeines	636
7.2	Wesen der Korrosion	637
7.3	Korrosionsschutz	644
7.3.1	Passiver Korrosionsschutz	644
7.3.1.1	Allgemeines	644
7.3.1.2	Verfahren des passiven Korrosionsschutzes	646
7.3.2	Aktiver Korrosionsschutz	650
7.3.2.1	Aktiver Korrosionsschutz durch Veränderungen am Werkstoff	650
7.3.2.2	Aktiver Korrosionsschutz durch Beeinflussung der Angriffsbedingungen	651
7.3.2.3	Aktiver Korrosionsschutz durch Maßnahmen am angreifenden Medium	653
7.4	Korrosionsprüfungen	654
7.5	Literatur- und Quellenverzeichnis	655
8	Zusammenstellung von Normen	656
	Sachwortverzeichnis	670