

Wolfgang Weißbach

Werkstoffkunde

Strukturen, Eigenschaften, Prüfung

17., überarbeitete und aktualisierte Auflage

Mit 298 Abbildungen und 246 Tabellen

Unter Mitarbeit von Michael Dahms

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegende Begriffe und Zusammenhänge	1
1.1	Gegenstand und Bedeutung der Werkstoffkunde	1
1.1.1	Das Fachgebiet Werkstoffe	1
1.1.2	Stellung und Bedeutung der Werkstoffkunde in der Technik	3
1.2	Entwicklungsrichtungen der Werkstofftechnik	5
1.2.1	Bessere Nutzung von Werkstoff und Energie (Material- und Energieeffizienz)	6
1.2.2	Oberflächenbehandlungen, Nanotechnologie	7
1.2.3	Energieeinsparung und bessere Nutzung	7
1.2.4	Innovative Werkstoffanwendung	7
1.3	Wie lassen sich die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe erklären?	8
1.3.1	Beschreibung der Werkstoffstruktur	9
1.3.2	Atombau und Periodensystem (PSE)	11
1.3.3	Kristallgitter und Bindungsart	12
1.3.4	Einflussnahme auf das Kristallgitter	14
1.3.5	Gefüge und Änderungsmöglichkeiten	14
1.4	Auswahlprinzip für Werkstoffe	15
1.4.1	Anforderungsprofil	15
1.4.2	Eigenschaftsprofil	16
2	Metallische Werkstoffe	17
2.1	Metallkunde	17
2.1.1	Vorkommen	17
2.1.2	Metallbindung	17
2.1.3	Metalleigenschaften	19
2.1.4	Die Kristallstrukturen der Metalle (Idealkristalle)	22
2.1.5	Entstehung des Gefüges und seine Ausrichtungen	26
2.1.6	Verformung am Idealkristall (Modellvorstellung)	30
2.2	Struktur und Verformung der Realkristalle	35
2.2.1	Kristallfehler	35
2.2.2	Verformung der Realkristalle und Veränderung der Eigenschaften	38
2.3	Verfestigungsmechanismen	38
2.3.1	Mischkristallverfestigung	39
2.3.2	Verformungsverfestigung	40
2.3.3	Korngrenzenverfestigung (Feinkorn)	41
2.3.4	Teilchenverfestigung	42
2.3.5	Verfestigungsmechanismen kombiniert	45
2.4	Vorgänge im Metallgitter bei höheren Temperaturen	45
2.4.1	Allgemeines	45
2.4.2	Kristallerholung und Rekristallisation	47
2.4.3	Kornvergrößerung (-wachstum)	49
2.4.4	Warmumformung	50
2.4.5	Diffusion	51

2.4.6	Werkstoffverhalten bei höheren Temperaturen unter Beanspruchung	53
2.5	Legierungen (Zweistofflegierungen)	57
2.5.1	Begriffe	57
2.5.2	Zustandsdiagramme, Allgemeines	61
2.5.3	Zustandsdiagramm mit vollkommener Mischbarkeit der Komponenten	61
2.5.4	Allgemeine Eigenschaften der Mischkristall-Legierungen	63
2.5.5	Eutektische Legierungssysteme (Grundtyp II)	64
2.5.6	Allgemeine Eigenschaften der eutektischen Legierungen	65
2.5.7	Ausscheidungen aus übersättigten Mischkristallen	67
2.5.8	Zustandsdiagramm mit intermetallischen Phasen	68
2.5.9	Übung: Auswertung eines Zustandsdiagrammes, Abkühlverlauf einer Cu-Zn-Legierung (64,5 % Cu)	69
2.5.10	Vergleich von homogenen und heterogenen Legierungen	70
2.5.11	Übersicht über Phasenumwandlungen im festen Zustand	71
3	Die Legierung Eisen-Kohlenstoff	72
3.1	Abkühlkurve und Kristallarten des Reineisens	72
3.2	Erstarrungsformen	74
3.3	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD)	76
3.3.1	Erstarrungsvorgänge	76
3.3.2	Die Umwandlungen im festen Zustand	77
3.4	Einfluss des Kohlenstoffs auf die Legierungseigenschaften	84
3.4.1	Mechanische Eigenschaften	84
3.4.2	Technologische Eigenschaften	85
4	Stähle	86
4.1	Erzeugung und Klassifizierung	86
4.1.1	Allgemeines	86
4.1.2	Ausgangsstoffe und Aufgaben der Stahlerzeugung	86
4.1.3	Rohstahlerzeugung	86
4.1.4	Sekundärmetallurgie	88
4.1.5	Vergießen und Erstarren des Stahles	89
4.1.6	Eisenbegleiter und Wirkung auf Gefüge und Stahleigenschaften	90
4.1.7	Einfluss der Legierungselemente	92
4.1.8	Einteilung der Stähle	95
4.2	Stähle für allgemeine Verwendung	97
4.2.1	Anforderungsprofil	97
4.2.2	Baustähle nach DIN EN 10025	98
4.3	Baustähle höherer Festigkeit	100
4.3.1	Die Erhöhung der Festigkeit	100
4.3.2	Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, nicht vergütet	101
4.3.3	Vergütete schweißgeeignete Feinkornbaustähle, DIN EN 10025-6/05 Blech und Breitflachstahl (DIN EN 10137-2 Z).	102
4.4	Stähle mit besonderen Eigenschaften	102
4.4.1	Kaltzähe Stähle	102
4.4.2	Wetterfeste Baustähle, DIN EN 10025-5/05	103
4.4.3	Austenitische Stähle	103
4.4.4	Ferritische Stähle	104
4.4.5	Stähle für Einsatz bei hohen Temperaturen	105

4.5	Stähle für bestimmte Fertigungsverfahren	107
4.5.1	Automatenstähle	107
4.5.2	Stähle zum Kaltumformen	107
4.5.3	Weitere Stahlsorten für bestimmte Fertigungsverfahren	111
4.6	Stähle für bestimmte Bauteile	111
4.6.1	Wälzlagerstähle	111
4.6.2	Federstähle	112
4.7	Werkzeugstähle	113
4.7.1	Allgemeines	113
4.7.2	Kaltarbeitsstähle	115
4.7.3	Warmarbeitsstähle	116
4.7.4	Kunststoff-Formenstähle	117
4.7.5	Schnellarbeitsstähle (HS-Stähle)	118
4.8	Stahlguss	119
4.8.1	Allgemeines	119
4.8.2	Stahlguss für allgemeine Verwendung	120
4.8.3	Weitere Stahlgusswerkstoffe	120
5	Wärmebehandlung des Stahles	122
5.1	Allgemeines	122
5.1.1	Einteilung der Verfahren	122
5.1.2	Zeit-Temperatur-Folgen	123
5.1.3	Austenitisierung (ZTA-Schaubilder)	124
5.2	Glühverfahren	126
5.2.1	Normalglühen	126
5.2.2	Glühen auf beste Verarbeitungseigenschaften	127
5.2.3	Spannungarmglühen	129
5.2.4	Diffusionsglühen	130
5.2.5	Rekristallisationsglühen	131
5.3	Härten und Vergüten	131
5.3.1	Allgemeines	131
5.3.2	Austenit zerfall	132
5.3.3	Martensit, Struktur und Bedingungen für die Entstehung	133
5.3.4	Härtbarkeit der Stähle	135
5.3.5	Verfahrenstechnik	137
5.3.6	Härteverzug und Gegenmaßnahmen	142
5.3.7	Zeit-Temperatur-Umwandlung (ZTU-Schaubilder)	143
5.3.8	Vergüten	146
5.4	Aushärten	150
5.4.1	Allgemeines	150
5.4.2	Verfahren	151
5.4.3	Ausscheidungshärtende Stähle	152
5.4.4	Vergleich Härten/Vergüten und Aushärten	153
5.4.5	Ausscheidungsvorgänge mit negativen Auswirkungen	153
5.5	Thermomechanische Verfahren	154
5.5.1	Allgemeines	154
5.5.2	Thermomechanische Behandlung (TM)	155
5.5.3	Austenitformhärten	155
5.5.4	Weitere Anwendungen	155

5.6	Verfahren der Oberflächenhärtung	157
5.6.1	Überblick	157
5.6.2	Randschichthärten	157
5.6.3	Einsatzhärten	160
5.6.4	Nitrieren, Nitrocarburieren	166
5.6.5	Weitere Verfahren (Auswahl)	170
5.6.6	Mechanische Verfahren	171
6	Eisen-Gusswerkstoffe	173
6.1	Übersicht und Einteilung	173
6.1.1	Vorteile der Gusskonstruktionen	173
6.1.2	Einteilung der Gusswerkstoffe	175
6.2	Allgemeines über die Gefüge- und Graphitusbildung bei Gusseisen	176
6.2.1	Gefügeausbildung	176
6.2.2	Graphitusbildung	177
6.3	Gusseisen mit Lamellengraphit GJL	178
6.4	Gusseisen mit Kugelgraphit GJS	180
6.5	Temperguss (GJMW/GJMB)	182
6.6	Gusseisen mit Vermiculargraphit	185
6.7	Sonderguss	186
7	Nichteisenmetalle	189
7.1	Allgemeines	189
7.2	Bezeichnung von NE-Metallen und -Legierungen	189
7.2.1	Übersicht	189
7.2.2	Werkstoff	190
7.2.3	Zustandsbezeichnungen	190
7.2.4	Knetlegierungen	191
7.2.5	Gusslegierungen	191
7.3	Aluminium	192
7.3.1	Vorkommen und Gewinnung	192
7.3.2	Einteilung der Al-Knetwerkstoffe	193
7.3.3	Unlegiertes Aluminium, Serie 1000	194
7.3.4	Nicht aushärtbare Legierungen	195
7.3.5	Aushärtbare Legierungen	196
7.3.6	Aluminium-Gusslegierungen	198
7.3.7	Aushärten der Aluminium-Legierungen	199
7.3.8	Neuentwicklungen	201
7.4	Kupfer	201
7.4.1	Vorkommen und Gewinnung	201
7.4.2	Eigenschaften, Verwendung	202
7.4.3	Normen für Kupfer und Kupferlegierungen	203
7.4.4	Niedriglegiertes Kupfer	204
7.4.5	Allgemeines zu den Kupfer-Legierungen	204
7.4.6	Kupfer-Zink-Legierungen	205
7.4.7	Kupfer-Zinn-Legierungen	207
7.4.8	Kupfer-Aluminium-Legierungen	208
7.4.9	Kupfer-Nickel-Legierungen	209
7.4.10	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	210

7.5	Magnesium	210
7.5.1	Vorkommen und Gewinnung	210
7.5.2	Eigenschaften von Magnesium	211
7.6	Titan	215
7.6.1	Metallgewinnung	215
7.6.2	Eigenschaften und Anwendung	215
7.6.3	Titanlegierungen (DIN 17 851/90)	216
7.7	Nickel (DIN 17743)	218
7.7.1	Rein-Nickel	218
7.7.2	Niedrig legiertes Nickel	218
7.7.3	Ni-Basis-Legierungen	218
7.8	Druckgusswerkstoffe	222
8	Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe	226
8.1	Einteilung und Abgrenzung	226
8.2	Struktur und Eigenschaften keramischer Stoffe	226
8.2.1	Thermoschockbeständigkeit	228
8.3	Bearbeitung der Werkstoffe	229
8.4	Werkstoffsorten	230
8.4.1	Oxidische Werkstoffe	230
8.4.2	Nichtoxidische Werkstoffe	232
8.5	Neue Verfahren zur Herstellung der Pulver-Ausgangsstoffe	236
8.6	Vergleich einiger anorganisch-nichtmetallischer Werkstoffe	237
9	Kunststoffe (Polymere)	239
9.1	Allgemeines	239
9.1.1	Entwicklung und Bedeutung	239
9.1.2	Begriffe und Einteilung der Polymere	239
9.1.3	Polymereigenschaften und ihre Prüfung	241
9.2	Monomere Stoffe und Entstehung der Polymere	243
9.2.1	Kohlenstoffatome	243
9.2.2	Kettenförmige Kohlenwasserstoffe (Aliphaten oder aliphatische KW)	243
9.2.3	Ringförmige Kohlenwasserstoffe (Aromaten)	244
9.2.4	Herstellung synthetischer Makromoleküle, Übersicht	245
9.2.5	Polykondensation	245
9.2.6	Polymerisation	246
9.2.7	Polyaddition	247
9.2.8	Systematische Benennung der Polymere	248
9.3	Strukturen der Makromoleküle	249
9.3.1	Bindungskräfte	249
9.3.2	Einfluss der Molekülmasse (Kettenlänge)	249
9.3.3	Gestalt der Makromoleküle	250
9.3.4	Kristallisation	252
9.4	Gefügeveränderungen bei Polymeren	253
9.4.1	Polymergemische, Polyblends	253
9.4.2	Zusatzstoffe und Einfluss auf die Eigenschaften	254
9.4.3	Faserverstärkung	254
9.5	Duroplaste	256
9.5.1	Allgemeines	256

9.5.2	Formmassetypen	256
9.5.3	Duroplastverarbeitung	258
9.6	Thermoplaste	259
9.6.1	Thermisches Verhalten	259
9.6.2	Langzeiteigenschaften der Kunststoffe	261
9.6.3	Thermoplastverarbeitung	264
9.6.4	Übersicht über die wichtigsten Thermoplaste	265
9.7	Elastomere	273
9.8	Statistische Daten und Eigenschaftsvergleiche	275
10	Verbundstrukturen und Verbundwerkstoffe	277
10.1	Begriffsklärung	277
10.1.1	Verbundkonstruktionen	277
10.1.2	Werkstoffverbunde	277
10.1.3	Verbundwerkstoffe	278
10.1.4	Struktur und Einteilung der Verbundwerkstoffe	279
10.2	Schichtverbundwerkstoffe	280
10.3	Faserverbundwerkstoffe (FVW)	281
10.3.1	Faserwerkstoffe und Eigenschaften	281
10.3.2	Faserverstärkte Polymere	282
10.4	Teilchenverbundwerkstoffe	283
10.5	Durchdringungsverbundwerkstoffe	284
10.6	Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe (MMC)	285
10.6.1	Allgemeines	285
10.6.2	Metallmatrix-Faserverbunde	286
10.6.3	Metallmatrix-Teilchenverbunde	286
10.6.4	Metallmatrix-Durchdringungsverbunde	288
10.6.5	Metallschäume	288
10.7	Keramik-Matrix-Verbunde (CMC)	289
10.7.1	Allgemeines	289
10.7.2	Faserverbundkeramik	289
10.7.3	Durchdringungsverbundkeramik	290
11	Werkstoffe besonderer Herstellung oder Eigenschaften	292
11.1	Pulvermetallurgie, Sintermetalle	292
11.1.1	Überblick und Einordnung	292
11.1.2	Herstellung der Pulver	294
11.1.3	Formgebung und Verdichten	295
11.1.4	Sintern	296
11.1.5	Nachbehandlung der Sinterteile	298
11.1.6	Werkstoffe	298
11.1.7	Klassifizierung, Normung	301
11.1.8	Sprühkompaktieren (Spray Forming)	302
11.2	Schichtwerkstoffe und Schichtherstellung	304
11.2.1	Begriffe, Abgrenzung	304
11.2.2	Verfahrensübersicht	305
11.2.3	Thermisches Spritzen	306
11.2.4	Auftragschweißen und -löten	308
11.2.5	Abscheiden aus der Gasphase	309

11.2.6	Beschichten aus dem ionisierten Zustand	313
11.3	Lager- und Gleitwerkstoffe	314
11.3.1	Allgemeines	314
11.3.2	Lagermetalle	315
11.3.3	Weitere Lagerwerkstoffe, selbstschmierende Lager	316
11.4	Werkstoffe für Lötungen	317
11.4.1	Allgemeines	317
11.4.2	Weichlote	317
11.4.3	Hartlote	318
11.5	Werkstoffe mit steuerbaren Eigenschaftsänderungen	319
11.5.1	Begriffe	319
11.5.2	Piezokeramik	320
11.5.3	Formgedächtnis-Legierungen (FGL)	321
11.5.4	Flüssigkeiten mit steuerbarer Viskosität	322
12	Korrosionsbeanspruchung und Korrosionsschutz	323
12.1	Einführung	323
12.1.1	Chemische Reaktion	324
12.1.2	Metallphysikalische Reaktion	324
12.1.3	Elektrochemische Reaktion	324
12.2	Grundlagen der elektrochemischen Korrosion	324
12.2.1	Die Entstehung von Ionen	324
12.2.2	Ursache der Ionenleitfähigkeit von H ₂ O	325
12.2.3	Lösungsdruck	325
12.2.4	Galvanische Spannungsreihe	326
12.2.5	Galvanisches Element	326
12.2.6	Korrosionselemente	327
12.3	Korrosionsarten	329
12.3.1	Korrosionsprodukte	329
12.3.2	Korrosionsarten und -erscheinungen	329
12.4	Korrosionsarten mit zusätzlichen Beanspruchungen	331
12.4.1	Korrosion und Festigkeitsbeanspruchung	331
12.4.2	Korrosion unter Tribo-Beanspruchung	332
12.4.3	Korrosion und thermische Beanspruchung	333
12.5	Korrosionsschutz	333
12.5.1	Trennung von Metall und Korrosionsmittel durch Schutzschichten	334
12.5.2	Korrosionsschutz durch Werkstoffwahl oder Eigenschaftsänderung	335
12.5.3	Änderung der Reaktionsbedingungen	337
13	Tribologische Beanspruchung und werkstofftechnische Maßnahmen	339
13.1	Allgemeines	339
13.1.1	Begriffsklärung	339
13.1.2	Das tribologische System	340
13.1.3	Der Bereich der Tribologie	340
13.2	Reibung und Reibungszustände	341
13.2.1	Reibungskraft und Reibungszustände	341
13.2.2	Reibungszustände	342
13.2.3	Stribeck-Kurve	343
13.3	Schmierstoffe	345

13.3.1	Allgemeines	345
13.3.2	Eigenschaften und Kenngrößen	345
13.3.3	Schmieröle	346
13.3.4	Schmierfette	347
13.3.5	Festschmierstoffe	348
13.4	Verschleiß	349
13.4.1	Verschleißmechanismen	349
13.4.2	Verschleißarten	349
13.4.3	Verschleißmessung und -kenngrößen	351
13.4.4	Verschleißschutz	351
14	Überlegungen zur Werkstoffwahl	356
14.1	Auswahlprinzip für Werkstoffe	356
14.1.1	Anforderungs- und Eigenschaftsprofil	356
14.1.2	Maßnahmen zur Verbesserung nicht ausreichender Eigenschaftsprofile	357
14.2	Werkstoffwahl, eine komplexe Optimierungsaufgabe	358
14.2.1	Allgemeines	358
14.2.2	Vereinfachte Direktwahl	359
14.2.3	Allgemeine, indirekte Wahl	360
14.2.4	Einfluss des Fertigungsweges auf die Werkstoffwahl	361
14.2.5	Integral- oder Differenzialbauweise?	361
14.2.6	Einfluss der Bauteilmerkmale auf den Fertigungsweg	362
14.2.7	Vergleich einiger Fertigungsverfahren	363
15	Werkstoffprüfung	365
15.1	Aufgaben, Abgrenzung	365
15.2	Prüfung von Werkstoffkennwerten	366
15.3	Messung der Härte	367
15.3.1	Härteprüfung nach Brinell	367
15.3.2	Härteprüfung nach Vickers (DIN EN ISO 6507/06)	370
15.3.3	Härteprüfung nach Rockwell (DIN EN ISO 6508/06)	370
15.3.4	Vergleich der Härtewerte	372
15.3.5	Dynamische Härteprüfung nach Shore	372
15.3.6	Schlaghärteprüfung (Poldi-Hammer)	373
15.4	Prüfung der Festigkeit bei statischer Belastung	373
15.4.1	Der Zugversuch (DIN EN 10 002/01)	374
15.4.2	Allgemeines Bruchverhalten	379
15.4.3	Zeitfestigkeiten	381
15.5	Prüfung der Festigkeit bei dynamischer Belastung	382
15.5.1	Allgemeines Verhalten	382
15.5.2	Dynamische Belastung	383
15.5.3	Dauerschwingfestigkeiten	385
15.5.4	Dauerschwingversuche (DIN 50 100/78)	385
15.5.5	Dauerfestigkeitsschaubild für Zug-Druck-Beanspruchung nach Smith	387
15.5.6	Dauerfestigkeit und Einflussgrößen	388
15.6	Prüfung der Zähigkeit	388
15.6.1	Spannungszustände	389
15.6.2	Kerbschlagbiegeversuch (DIN EN 10 045/91)	390
15.6.3	Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve	391

15.7	Prüfung von Verarbeitungseigenschaften	392
15.8	Untersuchung des Gefüges	394
15.8.1	Mikroskopische Untersuchungen	394
15.8.2	Quantitative Gefügeanalyse	395
15.8.3	Makroskopische Untersuchungen	396
15.9	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Qualitätskontrolle	396
15.9.1	Allgemeines	396
15.9.2	Eindringverfahren (Penetrierverfahren, DIN EN 571/97)	397
15.9.3	Magnetische Prüfungen (DIN EN ISO 9934/02)	397
15.9.4	Magnetinduktive Prüfung (Wirbelstromprüfung, DIN EN 12084/01)	398
15.9.5	Ultraschallprüfung (DIN EN 583, Teil 1–5/97–02)	398
15.9.6	Röntgen-/Gammastrahlen-Prüfung (DIN EN 444/94)	400
15.10	Überprüfung der chemischen Zusammensetzung	402
15.10.1	Funkenspektrometrie	403
15.10.2	Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX) im Rasterelektronenmikroskop ..	403
Anhang A: Die systematische Bezeichnung der Werkstoffe		405
A.1	Kennzeichnung der Stähle	405
A.1.1	Bezeichnungssystem für Stähle	405
A.1.2	Aufbau des Kurznamens (DIN EN 10027-1)	405
A.1.3	Stähle für den Stahlbau	406
A.1.4	Stähle für Druckbehälter	406
A.1.5	Stähle für den Maschinenbau	406
A.1.6	Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus höherfesten Stählen zum Kaltumformen	407
A.1.7	Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus weichen Stählen zum Kaltumformen ...	407
A.1.8	Nach der chemischen Zusammensetzung bezeichnete Stähle	407
A.1.8.1	Unlegierte Stähle mit mittlerem Mn-Gehalt < 1 %	407
A.1.8.2	Niedriglegierte Stähle (mittlerer Gehalt der LE < 5 %)	407
A.1.8.3	Nichtrostende Stähle und andere legierte Stähle	408
A.1.8.4	Schnellarbeitsstähle	408
A.1.9	Nummernsystem (DIN EN 10027-2/92)	409
A.2	Bezeichnung der Eisen-Guss-Werkstoffe	411
A.3	Bezeichnung der NE-Metalle	412
A.3.1	Allgemeines	412
A.3.2	Bezeichnung von Aluminium und -legierungen	412
A.3.3	Bezeichnung von Kupfer und -legierungen	413
A.4	Bezeichnung der Kunststoffe	414
	Bildquellenverzeichnis	416
	Sachwortverzeichnis	417