

Wolfgang Weißbach

Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung

15., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit über 300 Abbildungen und 300 Tafeln

Unter Mitarbeit von Michael Dahms

Viewegs Fachbücher der Technik



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	Gewichtsreduzierung	5
1.2.2	Verschleiß, Korrosion und Abfall vermindern	6
1.2.3	Energieeinsparung und bessere Nutzung	6
1.2.4	Innovative Werkstoffanwendung	7
1.3	Wie lassen sich die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe erklären?	8
1.3.1	Was bedeutet Struktur der Werkstoffe?	8
1.3.2	Unterteilung der Struktur und Einflussmöglichkeiten zur Veränderung	10
1.3.3	Atombau (Atommodelle nach Bohr u. a.)	10
1.3.4	Kristallgitter und Bindungsart	12
1.3.5	Einflussnahme auf das Kristallgitter	14
1.3.6	Gefüge und Änderungsmöglichkeiten	14
1.4	Auswahlprinzip für Werkstoffe	15
1.4.1	Anforderungsprofil	15
1.4.2	Eigenschaftsprofil	16
1.4.3	Auswahlgrundsatz	17
1.4.4	Maßnahmen zur Verbesserung nicht ausreichender Eigenschaftsprofile	17
1.5	Überlegungen zur Werkstoffwahl	18
1.5.1	Eine komplexe Optimierungsaufgabe	18
1.5.2	Vereinfachte Direktwahl	20
1.5.3	Allgemeine, indirekte Wahl	21
1.5.4	Einfluss des Fertigungsweges auf die Werkstoffwahl	21
1.5.5	Integral- oder Differenzialbauweise	22
1.5.6	Einfluss der Bauteilmerkmale auf den Fertigungsweg	23
1.5.7	Vergleich einiger Fertigungsverfahren	24
1.6	Übersicht, Einteilung der Fertigungsverfahren DIN 8580/03	25
2	Metallische Werkstoffe	31
2.1	Metallkunde	31
2.1.1	Vorkommen	31
2.1.2	Metallische Bindung	31
2.1.3	Metalleigenschaften	33
2.1.4	Die Kristallstrukturen der Metalle (Idealkristalle)	36
2.1.5	Entstehung des Gefüges und seine Ausrichtungen	40
2.1.6	Verformung am Idealkristall (Modellvorstellung)	44
2.2	Struktur und Verformung der Realkristalle	49
2.2.1	Kristallfehler	49
2.2.2	Verformung der Realkristalle und Veränderung der Eigenschaften	53

2.3	Verfestigungsmechanismen	53
2.3.1	Kaltverfestigung (auch Verformungs- oder Versetzungsverfestigung)	53
2.3.2	Mischkristallverfestigung	54
2.3.3	Korngrenzenverfestigung (Feinkorn)	55
2.3.4	Teilchenverfestigung	56
2.4	Vorgänge im Metallgitter bei höheren Temperaturen (Thermisch aktivierte Prozesse)	57
2.4.1	Allgemeines	57
2.4.2	Kristallerholung und Rekristallisation	59
2.4.3	Kornvergrößerung (-wachstum)	61
2.4.4	Warmumformung	62
2.4.5	Diffusion	63
2.4.6	Werkstoffverhalten bei höheren Temperaturen unter Beanspruchung	65
2.5	Legierungen (Zweistofflegierungen)	69
2.5.1	Begriffe	69
2.5.2	Zustandsdiagramme, Allgemeines	73
2.5.3	Zustandsdiagramm mit vollkommener Mischbarkeit der Komponenten	73
2.5.4	Allgemeine Eigenschaften der Mischkristall-Legierungen	75
2.5.5	Eutektische Legierungssysteme (Grundtyp II)	76
2.5.6	Allgemeine Eigenschaften der eutektischen Legierungen	77
2.5.7	Ausscheidungen aus übersättigten Mischkristallen	79
2.5.8	Zustandsdiagramm mit intermetallischen Phasen	80
2.5.9	Übung: Auswertung eines Zustandsdiagrammes, Abkühlverlauf einer Cu-Zn-Legierung mit 64,5 % Cu	81
2.5.10	Vergleich von homogenen und heterogenen Legierungen	82
2.5.11	Übersicht über Phasenumwandlungen im festen Zustand	83
3	Die Legierung Eisen-Kohlenstoff	84
3.1	Abkühlkurve und Kristallarten des Reineisens	84
3.2	Erstarrungsformen	86
3.3	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD)	88
3.3.1	Erstarrungsvorgänge	88
3.3.2	Die Umwandlungen im festen Zustand	89
3.4	Einfluss des Kohlenstoffs auf die Legierungseigenschaften	96
3.4.1	Mechanische Eigenschaften	96
3.4.2	Technologische Eigenschaften	97
3.5	Einfluss von Legierungselementen auf das EKD	98
3.5.1	Elemente, die das Austenitgebiet erweitern	98
3.5.2	Elemente, die das Austenitgebiet verkleinern	98
3.5.3	Wirkung mehrerer Elemente	99
3.6	Stahlerzeugung	100
3.6.1	Allgemeines	100
3.6.2	Die Wirkung der Eisenbegleiter auf Gefüge und Eigenschaften der Stähle	100
3.6.3	Rohstahlerzeugung	103
3.6.4	Sekundärmetallurgie	104
3.6.5	Vergießen und Erstarren des Stahles	105

4	Stahlsorten – Normen und Verwendungsgruppen	107
4.1	Der Werkstoff Stahl	107
4.1.1	Begriffe und Einleitung	107
4.1.2	Einfluss der LE auf das Gefüge	108
4.2	Stähle für allgemeine Verwendung	110
4.2.1	Anforderungsprofil	110
4.2.2	Baustähle nach DIN EN 10025	111
4.3	Baustähle höherer Festigkeit	113
4.3.1	Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, nicht vergütet	113
4.3.2	Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, vergütet oder ausgehärtet	114
4.4	Stähle mit besonderen Eigenschaften	115
4.4.1	Wetterfeste Baustähle	115
4.4.2	Kaltzähe Stähle	115
4.4.3	Austenitische Stähle	116
4.4.4	Ferritische Stähle	117
4.4.5	Stähle für den Einsatz bei hohen Temperaturen	118
4.5	Stähle für bestimmte Fertigungsverfahren	120
4.5.1	Automatenstähle	120
4.5.2	Stähle zum Kaltumformen	120
4.5.3	Weitere Stahlsorten	124
4.6	Stähle für bestimmte Bauteile	124
4.6.1	Wälzlagerstähle	124
4.6.2	Federstähle	125
4.7	Werkzeugstähle	126
4.7.1	Allgemeines	126
4.7.2	Kaltarbeitsstähle	128
4.7.3	Warmarbeitsstähle	130
4.7.4	Kunststoff-Formenstähle	131
4.7.5	Schnellarbeitsstähle (HS-Stähle)	131
4.8	Stahlguss	133
4.8.1	Allgemeines	133
4.8.2	Stahlguss für allgemeine Verwendung	133
4.8.3	Stahlguss mit guter Schweißbeignung	134
4.8.4	Weitere Stahlgusswerkstoffe, Übersicht	134
5	Stoffeigenschaftändern	136
5.1	Allgemeines	136
5.1.1	Einteilung der Verfahren	136
5.1.2	Temperatur-Zeit-Verlauf bei der Wärmebehandlung (ϑ , t -Verlauf)	137
5.1.3	Austenitisierung (ZTA-Schaubilder)	138
5.2	Glühverfahren	140
5.2.1	Normalglühen (Umkörnen)	140
5.2.2	Glühen auf beste Verarbeitungs-Eigenschaften	141
5.2.3	Spannungsarmglühen	143
5.2.4	Diffusionsglühen	144
5.2.5	Rekristallisationsglühen	145
5.3	Härten und Vergüten	145
5.3.1	Allgemeines	145

5.3.2	Austenitzerfall	146
5.3.3	Martensit, Struktur und Entstehungsbedingungen	147
5.3.4	Härtbarkeit der Stähle	149
5.3.5	Verfahrenstechnik	151
5.3.6	Härteverzug und Gegenmaßnahmen	156
5.3.7	Zeit-Temperatur-Umwandlung-Schaubilder (ZTU-Diagramme)	157
5.3.8	Vergüten	160
5.4	Aushärten	164
5.4.1	Allgemeines	164
5.4.2	Innere Vorgänge	165
5.4.3	Verfahren	166
5.4.4	Bedeutung und Anwendung der Aushärtung	166
5.4.5	Unterschied zum Härten und Vergüten	168
5.5	Thermomechanische Verfahren	168
5.5.1	Allgemeines	168
5.5.2	Austenitformhärten	169
5.5.3	Thermomechanische Behandlung (TM)	169
5.6	Verfahren der Oberflächenhärtung	170
5.6.1	Überblick	170
5.6.2	Randschichthärten	170
5.6.3	Einsatzhärten	173
5.6.4	Nitrieren, Nitrocarburieren	179
5.6.5	Weitere Verfahren (Auswahl)	183
5.6.6	Mechanische Verfahren	184
6	Eisen-Gusswerkstoffe	186
6.1	Übersicht und Einteilung	186
6.1.1	Vorteile der Gusskonstruktionen:	186
6.1.2	Einteilung der Gusswerkstoffe	188
6.2	Allgemeines über die Gefüge- und Graphitbildung bei Gusseisen	189
6.2.1	Gefügeausbildung	189
6.2.2	Graphitbildung	190
6.3	Gusseisen mit Lamellengraphit GJL	191
6.4	Gusseisen mit Kugelgraphit GJS	193
6.5	Temperguss GJMW/GJMB	194
6.6	Gusseisen mit Vermiculargraphit GJV	198
6.7	Sonderguss	199
7	Nichteisenmetalle	201
7.1	Allgemeines	201
7.2	Bezeichnung von NE-Metallen und -Legierungen	201
7.2.1	Übersicht	201
7.2.2	Legierungen	202
7.2.3	Zustandsbezeichnungen	202
7.2.4	Knetlegierungen	203
7.2.5	Gusslegierungen	203
7.3	Aluminium	204
7.3.1	Vorkommen und Gewinnung	204

7.3.2	Einteilung der Al-Knetwerkstoffe	205
7.3.3	Unlegiertes Aluminium, Serie 1000	206
7.3.4	Nicht aushärtbare Legierungen	207
7.3.5	Aushärtbare Legierungen	208
7.3.6	Aluminium-Gusslegierungen	209
7.3.7	Aushärten der Aluminium-Legierungen	210
7.3.8	Neuentwicklungen	212
7.4	Kupfer	213
7.4.1	Unlegiertes Kupfer	213
7.4.2	Eigenschaften, Verwendung	214
7.4.3	Normen für Kupfer und Kupferlegierungen	215
7.4.4	Niedriglegiertes Kupfer	216
7.4.5	Allgemeines zu den Kupfer-Legierungen	216
7.4.6	Kupfer-Zink-Legierungen	217
7.4.7	Kupfer-Zinn-Legierungen	219
7.4.8	Kupfer-Aluminium-Legierungen	220
7.4.9	Kupfer-Nickel-Legierungen	221
7.4.10	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	221
7.5	Magnesium	222
7.6	Titan	224
7.6.1	Vorkommen und Gewinnung	224
7.6.2	Eigenschaften und Anwendung	224
7.6.3	Titanlegierungen	225
7.7	Nickel	226
7.8	Druckgusswerkstoffe	227
8	Anorganisch – nichtmetallische Werkstoffe	231
8.1	Einteilung und Abgrenzung	231
8.2	Struktur und Eigenschaften keramischer Stoffe	231
8.3	Bearbeitung der Werkstoffe	233
8.4	Werkstoffsorten	234
8.4.1	Oxidische Werkstoffe	234
8.4.2	Nichtoxidische Werkstoffe	234
8.5	Neue Verfahren zur Herstellung der Pulver-Ausgangsstoffe	236
8.6	Vergleich einiger nichtmetallisch anorganischer 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
9.1.4	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	Formmassentypen	256
9.5.3	Duroplastverarbeitung	258
9.6	Thermoplaste (Plastomere)	259
9.6.1	Thermische Eigenschaften	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	Eigenschaftsvergleiche und statistische Daten	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	285
10.6.3	Metallmatrix-Teilchenverbund	286
10.6.4	Metallmatrix-Durchdringungsverbunde	287
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	291
11.1	Pulvermetallurgie, Sintermetalle	291
11.1.1	Überblick und Einordnung	291
11.1.2	Herstellung der Pulver	293
11.1.3	Formgebung und Verdichten	294
11.1.4	Sintern	295
11.1.5	Nachbehandlung der Sinterteile	297
11.1.6	Werkstoffe	297
11.1.7	Klassifizierung, Normung	300
11.1.8	Sprühkompaktieren (OSpray-Verfahren)	301
11.2	Schichtwerkstoffe und Schichtherstellung	303
11.2.1	Begriffe, Abgrenzung	303
11.2.2	Verfahrensübersicht	304
11.2.3	Thermisches Spritzen	305
11.2.4	Auftragschweißen und -löten	307
11.2.5	Abscheiden aus der Gasphase	308
11.6	Beschichten aus dem ionisierten Zustand	312
11.3	Lager- und Gleitwerkstoffe	313
11.3.1	Allgemeines	313
11.3.2	Lagermetalle	315
11.3.3	Weitere Lagerwerkstoffe	316
11.4	Werkstoffe für Lötungen	316
11.4.1	Allgemeines	316
11.4.1	Weichlote	317
11.4.2	Hartlote	317
11.5	Werkstoffe mit steuerbaren Eigenschaftsänderungen	319
11.5.1	Begriffe	319
11.5.2	Piezokeramik	320
11.5.3	Formgedächtnis-Legierungen (FGL)	320
11.5.4	Flüssigkeiten mit steuerbarer Viskosität	322
12	Korrosionsbeanspruchung und Korrosionsschutz	323
12.1	Korrosion und Reaktionsarten	323
12.2	Korrosionselemente	325
12.2.1	Elektrochemische Spannungsreihe	325
12.2.2	Galvanisches Element	325
12.2.3	Korrosionselemente	325
12.3	Korrosionserscheinungen und -größen	326
12.4	Weitere Korrosionsarten	327
12.5	Korrosionsprodukte	328
12.6	Korrosion mit anderen Beanspruchungsarten überlagert	328
12.6.1	Korrosion und Festigkeitsbeanspruchung	329
12.6.2	Korrosion unter Tribo-Beanspruchung	330
12.6.3	Korrosion und thermische Beanspruchung	330
12.7	Korrosionsschutz	331
12.7.1	Korrosionsschutz durch Werkstoffauswahl oder Eigenschaftsänderung	332
12.7.2	Änderung der Reaktionsbedingungen	333
12.7.3	Trennung von Metall und Korrosionsmittel durch Schutzschichten	335

13 Tribologische Beanspruchung und werkstofftechnische Maßnahmen	337
13.1 Allgemeines	337
13.1.1 Begriffsklärung	337
13.1.2 Das tribologische System	338
13.1.3 Der Bereich der Tribologie	338
13.2 Reibung und Reibungszustände	339
13.2.1 Reibkraft und Reibungszustände	339
13.2.2 Reibungszustände	340
13.2.3 Stribeck-Kurve	341
13.3 Schmierstoffe	343
13.3.1 Allgemeines	343
13.3.2 Eigenschaften und Kenngrößen	343
13.3.3 Öle	346
13.3.4 Fette	348
13.3.5 Festschmierstoffe	349
13.4 Verschleiß	350
13.4.1 Verschleißmechanismen	350
13.4.2 Verschleißarten	350
13.4.3 Verschleißmessung und -kenngrößen	352
13.4.5 Verschleißschutz	353
14 Werkstoffprüfung	357
14.1 Aufgaben, Abgrenzung	357
14.2 Prüfung von Werkstoffkennwerten	358
14.3 Messung der Härte	359
14.3.1 Härteprüfung nach Brinell	359
14.3.2 Härteprüfung nach Vickers	362
14.3.3 Härteprüfung nach Rockwell	362
14.3.4 Vergleich der Härtewerte	364
14.3.5 Dynamische Härteprüfung nach Shore	364
14.4 Prüfung der Festigkeit bei statischer Belastung	365
14.4.1 Der Zugversuch	365
14.4.2 Allgemeines Bruchverhalten	370
14.4.3 Zeitfestigkeiten	372
14.5 Prüfung der Festigkeit bei dynamischer Belastung	373
14.5.1 Allgemeines Verhalten	373
14.5.2 Dynamische Belastung	374
14.5.3 Dauerschwingfestigkeiten	376
14.5.4 Dauerschwingversuche	376
14.5.5 Dauerfestigkeitsschaubild	378
14.5.6 Dauerfestigkeit und Einflussgrößen	379
14.6 Prüfung der Zähigkeit	379
14.6.1 Spannungszustände	380
14.6.2 Kerbschlagbiegeversuch	381
14.6.3 Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve	382
14.7 Prüfung von Verarbeitungseigenschaften	383
14.8 Untersuchung des Gefüges	385
14.8.1 Mikroskopische Untersuchungen	385
14.8.2 Makroskopische Untersuchungen	386

14.9	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Qualitätskontrolle	386
14.9.1	Allgemeines	386
14.9.2	Eindringverfahren (Penetrierverhalten)	387
14.9.3	Magnetische Prüfungen	387
14.9.4	Magnetinduktive Prüfung (Wirbelstromprüfung)	388
14.9.5	Ultraschallprüfung	388
14.9.6	Röntgen-/Gamma-Strahlen-Prüfung	390
Anhang A:	Die systematische Bezeichnung der Werkstoffe	393
A.1	Kennzeichnung der Stähle	393
A.1.1	Bezeichnungssystem für Stähle	393
A.1.2	Aufbau des Kurznamens	393
A.1.3	Stähle für den Stahlbau	394
A.1.4	Stähle für Druckbehälter	394
A.1.5	Stähle für den Maschinenbau	395
A.1.6	Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus höherfesten Stählen zum Kaltumformen	395
A:1.7	Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus weichen Stählen zum Kaltumformen	395
A.1.8	Nach der chemischen Zusammensetzung bezeichnete Stähle	395
A.1.8.1	Unlegierte Stähle mit mittlerem Mn-Gehalt < 1 %	396
A.1.8.2	Niedriglegierte Stähle (mittlerer Gehalt der LE < 5 %)	396
A.1.8.3	Hochlegierte Stähle	396
A.1.8.4	Schnellarbeitsstähle	396
A.1.9	Nummernsystem für Stähle	397
A.2	Bezeichnung der Eisen-Gusswerkstoffe	399
A.3	Bezeichnung der NE-Metalle	400
A.3.1	Allgemeines	400
A.3.2	Bezeichnung von Aluminium und -legierungen	400
A.3.3	Bezeichnung von Kupfer und -legierungen	401
A.4	Bezeichnung der Kunststoffe	402
	Bildquellenverzeichnis	403
	Sachwortverzeichnis	404