

Wolfgang Weißbach

Werkstoffkunde

Strukturen, Eigenschaften, Prüfung

16., überarbeitete Auflage

Mit 287 Abbildungen und 245 Tabellen

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	Leichtbau zur Reduktion des Werkstoff- und Energieverbrauches	6
1.2.2	Oberflächenbehandlungen, Nanotechnologie	6
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	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 nichtausreichender 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 Fertigungsverweges auf die Werkstoffwahl	21
1.5.5	Integral- oder Differenzialbauweise	22
1.5.6	Einfluss der Bauteilmerkmale auf den Fertigungsverweg	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	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	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 (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 Einteilung.....	107
4.1.2	Einfluss der Legierungselemente 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	Die Erhöhung der Festigkeit	113
4.3.2	Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, nicht vergütet.	114
4.3.3	Vergütete schweißgeeignete Feinkornbaustähle	115
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 Einsatz bei hohen Temperaturen	118
4.5	Stähle für bestimmte Fertigungsverfahren.....	120
4.5.1	Automatenstähle.....	120
4.5.2	Stähle zum Kaltumformen	121
4.5.3	Weitere Stahlsorten für bestimmte Fertigungsverfahren.....	124
4.6	Stähle für bestimmte Bauteile.....	125
4.6.1	Wälzlagerstähle.....	125
4.6.2	Federstähle	125
4.7	Werkzeugstähle	127
4.7.1	Allgemeines	127
4.7.2	Kaltarbeitsstähle	129
4.7.3	Warmarbeitsstähle.....	130
4.7.4	Kunststoff-Formenstähle.....	131
4.7.5	Schnellarbeitsstähle (HS-Stähle).....	132
4.8	Stahlguss.....	133
4.8.1	Allgemeines	133
4.8.2	Stahlguss für allgemeine Verwendung.....	134
4.8.3	Weitere Stahlgusswerkstoffe, Übersicht	134
5	Stoffeigenschaft ändern	136
5.1	Allgemeines.....	136
5.1.1	Einteilung der Verfahren.....	136
5.1.2	Zeit-Temperatur-Folgen.....	137
5.1.3	Austenitisierung (ZTA-Schaubilder)	138
5.2	Glühverfahren.....	140
5.2.1	Normalglühen.....	140
5.2.2	Glühen auf beste Verarbeitungseigenschaften	141
5.2.3	Spannungarmglühen.....	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 Bedingungen für die Entstehung	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	170
5.6	Verfahren der Oberflächenhärtung.....	171
5.6.1	Überblick	171
5.6.1	Randschichthärten.....	171
5.6.3	Einsatzhärten.....	174
5.6.4	Nitrieren, Nitrocarburieren	180
5.6.5	Weitere Verfahren (Auswahl).....	184
5.6.6	Mechanische Verfahren	185
6	Eisen-Gusswerkstoffe	187
6.1	Übersicht und Einteilung.....	187
6.1.1	Vorteile der Gusskonstruktionen	187
6.1.2	Einteilung der Gusswerkstoffe.....	189
6.2	Allgemeines über die Gefüge- und Graphitusbildung bei Gusseisen	190
6.2.1	Gefügeausbildung	190
6.2.2	Graphitusbildung.....	191
6.3	Gusseisen mit Lamellengraphit	192
6.4	Gusseisen mit Kugelgraphit	194
6.5	Temperguss	196
6.6	Gusseisen mit Vermiculargraphit	199
6.7	Sonderguss	200
7	Nichteisenmetalle.....	203
7.1	Allgemeines.....	203
7.2	Bezeichnung von NE-Metallen und -Legierungen.....	203
7.2.1	Übersicht.....	203
7.2.2	Werkstoff	204
7.2.3	Zustandsbezeichnungen	204
7.2.4	Knetlegierungen.....	205
7.2.5	Gusslegierungen.....	205

7.3	Aluminium.....	206
7.3.1	Vorkommen und Gewinnung.....	206
7.3.2	Einteilung der Al-Knetwerkstoffe.....	207
7.3.3	Unlegiertes Aluminium, Reihe 1000.....	208
7.3.4	Nicht aushärtbare Legierungen	209
7.3.5	Aushärtbare Legierungen	210
7.3.6	Aluminium-Gusslegierungen	211
7.3.7	Aushärten der Aluminium-Legierungen	212
7.3.8	Neuentwicklungen	214
7.4	Kupfer.....	215
7.4.1	Unlegiertes Kupfer	215
7.4.2	Eigenschaften, Verwendung	216
7.4.3	Normen für Kupfer und Kupferlegierungen.....	217
7.4.4	Niedriglegiertes Kupfer.....	218
7.4.5	Allgemeines zu den Kupfer-Legierungen	218
7.4.6	Kupfer-Zink-Legierungen.....	219
7.4.7	Kupfer-Zinn-Legierungen.....	221
7.4.8	Kupfer-Aluminium-Legierungen	222
7.4.9	Kupfer-Nickel-Legierungen.....	223
7.4.10	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen.....	224
7.5	Magnesium	224
7.5.1	Vorkommen und Gewinnung.....	224
7.5.2	Eigenschaften von Magnesium	225
7.6	Titan.....	229
7.6.1	Metallgewinnung	229
7.6.2	Eigenschaften und Anwendung	229
7.6.3	Titanlegierungen (DIN 17 851/90)	230
7.7	Nickel (DIN 17743).....	232
7.8	Druckgusswerkstoffe.....	232
8	Anorganisch – nichtmetallische Werkstoffe	236
8.1	Einteilung und Abgrenzung.....	236
8.2	Struktur und Eigenschaften keramischer Stoffe	236
8.3	Bearbeitung der Werkstoffe.....	238
8.4	Werkstoffsorten	239
8.4.1	Oxidische Werkstoffe	239
8.4.2	Nichtoxidische Werkstoffe	240
8.5	Neue Verfahren zur Herstellung der Pulver-Ausgangsstoffe	244
8.6	Vergleich einiger nichtmetallisch anorganischer Werkstoffe.....	245
9	Kunststoffe (Polymere)	246
9.1	Allgemeines.....	246
9.1.1	Entwicklung und Bedeutung.....	246
9.1.2	Begriffe und Einteilung der Polymere	246
9.1.3	Polymereigenschaften und ihre Prüfung	248
9.2	Monomere Stoffe und Entstehung der Polymere.....	250
9.2.1	Kohlenstoffatome.....	250

9.2.2	Kettenförmige Kohlenwasserstoffe (Aliphaten oder aliphatische KW)	250
9.2.3	Ringförmige Kohlenwasserstoffe	251
9.2.4	Herstellung synthetischer Makromoleküle, Übersicht	252
9.2.5	Polykondensation	252
9.2.6	Polymerisation	253
9.2.7	Polyaddition	254
9.2.8	Systematische Benennung der Polymere	255
9.3	Strukturen der Makromoleküle	256
9.3.1	Bindungskräfte	256
9.3.2	Einfluss der Molekülmasse (Kettenlänge)	256
9.3.3	Gestalt der Makromoleküle	257
9.3.4	Kristallisation	259
9.4	Gefügeveränderungen bei Polymeren	260
9.4.1	Polymergemische, Polyblends	260
9.4.2	Zusatzstoffe und Einfluss auf die Eigenschaften	261
9.4.3	Faserverstärkung	261
9.5	Duroplaste	263
9.5.1	Allgemeines	263
9.5.2	Formmassetypen	263
9.5.3	Duroplastverarbeitung	265
9.6	Thermoplaste	266
9.6.1	Thermisches Verhalten	266
9.6.2	Langzeiteigenschaften der Kunststoffe	268
9.6.3	Thermoplastverarbeitung	271
9.6.4	Übersicht über die wichtigsten Thermoplaste	272
9.7	Elastomere	280
9.8	Statistische Daten und Eigenschaftsvergleiche	282
10	Verbundstrukturen und Verbundwerkstoffe	284
10.1	Begriffsklärung	284
10.1.1	Verbundkonstruktionen	284
10.1.2	Werkstoffverbunde	284
10.1.3	Verbundwerkstoffe	285
10.1.4	Struktur und Einteilung der Verbundwerkstoffe	286
10.2	Schichtverbundwerkstoffe	287
10.3	Faserverbundwerkstoffe (FVW)	288
10.3.1	Faserwerkstoffe und Eigenschaften	288
10.3.2	Faserverstärkte Polymere	289
10.4	Teilchenverbundwerkstoffe	290
10.5	Durchdringungsverbundwerkstoffe	291
10.6	Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe MMC	292
10.6.1	Allgemeines	292
10.6.2	Metallmatrix-Faserverbunde	293
10.6.3	Metallmatrix-Teilchenverbunde	293
10.6.4	Metallmatrix-Durchdringungsverbunde	295
10.6.5	Metallschäume	295
10.7	Keramik-Matrix-Verbunde CMC	296

10.7.1	Allgemeines	296
10.7.2	Faserverbundkeramik.....	296
10.7.3	Durchdringungsverbundkeramik	297
11	Werkstoffe besonderer Herstellung oder Eigenschaften	299
11.1	Pulvermetallurgie, Sintermetalle	299
11.1.1	Überblick und Einordnung.....	299
11.1.2	Herstellung der Pulver	301
11.1.3	Formgebung und Verdichten	302
11.1.4	Sintern.....	303
11.1.5	Nachbehandlung der Sinterteile	305
11.1.6	Werkstoffe.....	305
11.1.7	Klassifizierung, Normung.....	308
11.1.8	Sprühkompaktieren (Spray Forming)	309
11.2	Schichtwerkstoffe und Schichtherstellung	311
11.2.1	Begriffe, Abgrenzung.....	311
11.2.2	Verfahrensübersicht	312
11.2.3	Thermisches Spritzen	313
11.2.4	Auftragschweißen und -löten	315
11.2.5	Abscheiden aus der Gasphase	316
11.2.6	Beschichten aus dem ionisierten Zustand	320
11.3	Lager- und Gleitwerkstoffe	321
11.3.1	Allgemeines	321
11.3.2	Lagermetalle.....	323
11.3.3	Weitere Lagerwerkstoffe.....	324
11.4	Werkstoffe für Lötungen	324
11.4.1	Allgemeines	324
11.4.2	Weichlote	325
11.4.3	Hartlote	325
11.5	Werkstoffe mit steuerbaren Eigenschaftsänderungen.....	327
11.5.1	Begriffe	327
11.5.2	Piezokeramik.....	328
11.5.3	Formgedächtnis-Legierungen (FGL)	328
11.5.4	Flüssigkeiten mit steuerbarer Viskosität	330
12	Korrosionsbeanspruchung und Korrosionsschutz	331
12.1	Einführung	331
12.1.1	Chemische Reaktion.....	332
12.2	Grundlagen der elektrochemischen Korrosion	332
12.2.1	Die Entstehung von Ionen.....	332
12.2.2	Ursache der Ionenleitfähigkeit von H ₂ O	333
12.2.3	Lösungsdruck:.....	333
12.2.4	Galvanische Spannungsreihe	334
12.2.5	Galvanisches Element	334
12.2.6	Korrosionselemente.....	335
12.3	Korrosionsarten	337
12.3.1	Korrosionsprodukte.....	337

12.3.2	Korrosionsarten und -erscheinungen	337
12.4	Korrosionsarten mit zusätzlichen Beanspruchungen.....	339
12.4.1	Korrosion und Festigkeitsbeanspruchung.....	339
12.4.2	Korrosion unter Tribo-Beanspruchung	340
12.4.3	Korrosion und thermische Beanspruchung	341
12.5	Korrosionsschutz.....	341
12.5.1	Trennung von Metall und Korrosionsmittel durch Schutzschichten.....	342
12.5.2	Korrosionsschutz durch Werkstoffwahl oder Eigenschaftsänderung	343
12.5.3	Änderung der Reaktionsbedingungen.....	345
13	Tribologische Beanspruchung und werkstofftechnische Maßnahmen	347
13.1	Allgemeines.....	347
13.1.1	Begriffsklärung	347
13.1.2	Das tribologische System.....	348
13.1.3	Der Bereich der Tribologie	348
13.2	Reibung und Reibungszustände	349
13.2.1	Reibkraft und Reibungszustände	349
13.2.2	Reibungszustände	350
13.2.3	Stribeck-Kurve.....	351
13.3	Schmierstoffe.....	353
13.3.1	Allgemeines	353
13.3.2	Eigenschaften und Kenngrößen	353
13.3.3	Öle.....	356
13.3.4	Fette	358
13.3.5	Festschmierstoffe	359
13.4	Verschleiß.....	360
13.4.1	Verschleißmechanismen	360
13.4.2	Verschleißarten	360
13.4.3	Verschleißmessung und -kenngrößen	362
13.4.4	Verschleißschutz.....	363
14	Werkstoffprüfung	367
14.1	Aufgaben, Abgrenzung	367
14.2	Prüfung von Werkstoffkennwerten	368
14.3	Messung der Härte.....	369
14.3.1	Härteprüfung nach Brinell	369
14.3.2	Härteprüfung nach Vickers	372
14.3.3	Härteprüfung nach Rockwell	372
14.3.4	Vergleich der Härtewerte.....	374
14.3.5	Dynamische Härteprüfung nach Shore	374
14.4	Prüfung der Festigkeit bei statischer Belastung	375
14.4.1	Der Zugversuch	375
14.4.2	Allgemeines Bruchverhalten.....	380
14.4.3	Zeitfestigkeiten	382
14.5	Prüfung der Festigkeit bei dynamischer Belastung	383
14.5.1	Allgemeines Verhalten.....	383
14.5.2	Dynamische Belastung.....	384

14.5.3	Dauerschwingfestigkeiten	386
14.5.4	Dauerschwingversuche	386
14.5.5	Dauerfestigkeitsschaubild	388
14.5.6	Dauerfestigkeit und Einflussgrößen	389
14.6	Prüfung der Zähigkeit	389
14.6.1	Spannungszustände	390
14.6.2	Kerbschlagbiegeversuch	391
14.6.3	Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve	392
14.7	Prüfung von Verarbeitungseigenschaften	393
14.8	Untersuchung des Gefüges	395
14.8.1	Mikroskopische Untersuchungen	395
14.8.2	Makroskopische Untersuchungen	396
14.9	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Qualitätskontrolle	396
14.9.1	Allgemeines	396
14.9.2	Eindringverfahren	397
14.9.3	Magnetische Prüfungen	397
14.9.4	Magnetinduktive Prüfung	398
14.9.5	Ultraschallprüfung	398
14.9.6	Röntgen-/Gamma-Strahlen-Prüfung	400
Anhang A: Die systematische Bezeichnung der Werkstoffe		403
A.1	Kennzeichnung der Stähle	403
A.1.1	Bezeichnungssystem für Stähle	403
A.1.2	Aufbau des Kurznamens DIN EN 10027-1	403
A.1.3	Stähle für den Stahlbau	404
A.1.4	Stähle für Druckbehälter	404
A.1.5	Stähle für den Maschinenbau	404
A.1.6	Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus höherfesten Stählen zum Kaltumformen	405
A.1.7	Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus weichen Stählen zum Kaltumformen	405
A.1.8	Nach der chemischen Zusammensetzung bezeichnete Stähle	405
A.1.8.1	Unlegierte Stähle mit mittlerem Mn-Gehalt < 1 %	405
A.1.8.2	Niedriglegierte Stähle (mittlerer Gehalt der LE < 5 %)	405
A.1.8.3	Hochlegierte Stähle	406
A.1.8.4	Schnellarbeitsstähle	406
A.1.9	Nach der chemischen Zusammensetzung bezeichnete Stähle	407
A.2	Bezeichnung der Eisen-Guss-Werkstoffe	409
A.3	Bezeichnung der NE-Metalle	410
A.3.1	Allgemeines	410
A.4	Bezeichnung der Kunststoffe	412
	Bildquellenverzeichnis	414
Sachwortverzeichnis		415