

Wolfgang Weißbach

Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung

unter Mitarbeit von Uwe Bleyer

Mit 290 Bildern und 300 Tafeln

12., vollständig überarbeitete
und erweiterte Auflage



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	Gewichtseinsparung	6
1.2.2	Energieeinsparung und bessere Nutzung	7
1.2.3	Innovative Werkstoffanwendung	8
1.3	Wie lassen sich die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe erklären?	9
1.3.1	Was bedeutet Struktur der Werkstoffe?	9
1.3.2	Unterteilung der Struktur und Einflußmöglichkeiten zur Veränderung	11
1.3.3	Atombau (Atommodell nach Bohr)	11
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 Differentialbauweise	22
1.5.6	Einfluß der Bauteilmerkmale auf den Fertigungsweg	23
1.5.7	Vergleich einiger Fertigungsverfahren	24
1.6	Übersicht, Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580	25
2	Metalle und Legierungen	31
2.1	Grundlagen und Reinelemente	31
2.1.1	Einteilung und Häufigkeit	31
2.1.2	Aufbau des Metallgitters	31
2.1.3	Metalleigenschaften	34
2.1.4	Kristallgittertypen der Metalle	35
2.1.5	Kristallfehler	38
2.1.6	Entstehung des Gefüges	39

2.1.7	Ausnutzung der Kristallisationswärme zur thermischen Analyse . .	41
2.2	Die Auswirkungen der Kristallstruktur auf die mechanischen Eigenschaften	43
2.2.1	Anisotropie	43
2.2.2	Textur	44
2.2.3	Verformung bei Raumtemperatur	45
2.2.4	Plastische Verformung im Realkristall	48
2.2.5	Kaltverfestigung	49
2.2.6	Rekristallisation	51
2.2.7	Kornvergrößerung (Kornwachstum, Grobkornbildung)	54
2.3	Legierungen (Zweistofflegierungen)	56
2.3.1	Begriffe und Phasenregel	56
2.3.2	Entstehung eines Zustandsschaubildes (Zweistofflegierungen) . . .	59
2.3.3	Zustandsschaubild Grundtyp I (System Kristallgemisch)	60
2.3.4	Das Lesen von Zustandsschaubildern	61
2.3.5	Allgemeine Eigenschaften der Legierungen vom Grundtyp I	63
2.3.6	Zustandsschaubild Grundtyp II (System Mischkristall)	64
2.3.7	Allgemeine Eigenschaften der Mischkristalle	66
2.3.8	Vergleich der beiden Grundtypen I und II	68
2.3.9	Weitere Kristallarten in Legierungen	69
2.3.10	Diffusion in Metallen	72
3	Die Legierung Eisen-Kohlenstoff	74
3.1	Abkühlungskurve und Kristallarten des Eisens	74
3.2	Erstarrungsformen	76
3.3	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	78
3.3.1	Erstarrungsvorgänge	78
3.3.2	Die Umwandlungen im festen Zustand	79
3.4	Stahleigenschaften und Einfluß von Kohlenstoff und Eisenbegleitern	84
3.4.1	Wirkung des Kohlenstoffs	84
3.4.2	Die Wirkung der Eisenbegleiter auf Gefüge und Eigenschaften der Stähle	88
4	Stahlerzeugung und Stahlsorten	92
4.1	Der Werkstoff Stahl	92
4.1.1	Allgemeines	92
4.1.2	Einteilung der Stähle	92
4.2	Stahlerzeugung	93
4.2.1	Rohstahlerzeugung	93
4.2.2	Sekundärmetallurgie	94
4.2.3	Das Erstarren des Stahles	95
4.3	Stähle für allgemeine Verwendung	96
4.3.1	Baustähle nach DIN EN 10025	96
4.3.2	Baustähle höherer Festigkeit	98

4.4	Stähle mit besonderen Eigenschaften	99
4.4.1	Wetterfeste Baustähle (DIN EN 10155)	99
4.4.2	Kaltzähe Stähle	99
4.4.3	Hinweise auf weitere Stahlsorten	100
4.5	Stähle für bestimmte Fertigungsverfahren	100
4.5.1	Automatenstähle	100
4.5.2	Kaltgewalzte Flacherzeugnisse zum Kaltumformen	100
4.5.3	Hinweise auf weitere Stahlsorten	102
4.6	Stähle für bestimmte Bauteile	102
4.6.1	Federstähle	102
4.6.2	Hinweise auf weitere Stahlsorten	102
4.7	Stahlguß	102
5	Stoffeigenschaftändern	104
5.1	Allgemeines	104
5.1.1	Einteilung der Verfahren	104
5.1.2	Temperatur-Zeit-Verlauf	105
5.1.3	Austenitisierung (ZTA-Schaubilder)	106
5.2	Glühverfahren	108
5.2.1	Normalglühen (Umkörnen)	108
5.2.2	Glühen auf beste Verarbeitungseigenschaften (Grobkornglühen, Weichglühen)	109
5.2.3	Spannungsarmglühen	111
5.2.4	Diffusionsglühen	112
5.2.5	Rekristallisationsglühen	113
5.3	Härten und Vergüten	113
5.3.1	Allgemeines	113
5.3.2	Austenitfall	114
5.3.3	Martensit, Struktur und Entstehungsbedingungen	115
5.3.4	Härtbarkeit der Stähle	117
5.3.5	Verfahrenstechnik	119
5.3.6	Härteverzug und Gegenmaßnahmen	124
5.3.7	Zeit-Temperatur-Umwandlung-Schaubilder	125
5.3.8	Vergüten	128
5.4	Aushärten	132
5.4.1	Allgemeines	132
5.4.2	Innere Vorgänge	133
5.4.3	Verfahren	134
5.4.4	Bedeutung und Anwendung der Aushärtung	134
5.4.5	Unterschied zum Härten und Vergüten	136
5.5	Thermomechanische Verfahren	136
5.5.1	Allgemeines	136
5.5.2	Austenitformhärten	137
5.5.3	Thermomechanische Behandlung (TM)	137

6	Oberflächentechnik	139
6.1	Allgemeines	139
6.2	Übersicht über die Verfahren durch Stoffeigenschaftändern	140
6.3	Thermische Verfahren	140
6.3.1	Randschichthärten	140
6.3.2	Umschmelzhärten	142
6.4	Thermochemische Verfahren	143
6.4.1	Einsatzhärten	143
6.4.2	Nitrieren, Nitrocarburieren	149
6.4.3	Weitere Verfahren (Auswahl)	153
6.5	Mechanische Verfahren	154
6.5.1	Verfestigungswalzen	154
6.5.2	Verfestigungsstrahlen	154
6.6	Übersicht über die Verfahren des Beschichtens	155
6.6.1	Allgemeines	155
6.6.2	Schichtwerkstoffe und Verfahren	156
6.6.3	Schmelztauchen	156
6.6.4	Thermisches Spritzen	157
6.6.5	Auftragschweißen	158
6.6.6	Abscheiden aus der Gasphase	158
6.6.7	Beschichten aus dem ionisierten Zustand	160
7	Eisen-Gußwerkstoffe	162
7.1	Übersicht und Einteilung	162
7.1.1	Vorteile der Gußkonstruktionen	162
7.1.2	Einteilung der Gußwerkstoffe	164
7.2	Allgemeines über die Gefüge- und Graphitbildung	165
7.3	Gußeisen mit Lamellengraphit GJL, DIN EN 1561 (GG DIN 1691)	167
7.4	Gußeisen mit Kugelgraphit GJS, DIN EN 1563 (GGG DIN 1693)	169
7.5	Temperguß GJMW / GJMB, DIN EN 1562 (GTW / GTS DIN 1692)	170
7.6	Gußeisen mit Vermiculargraphit GJV (GGV)	174
7.7	Sonderguß	175
8	Legierte Stähle	177
8.1	Allgemeines	177
8.2	Einfluß der Legierungselemente auf Gefüge und EKD	178
8.2.1	Mischkristallbildner	178
8.2.2	Carbidbildner	179
8.2.3	Nitridbildner	179
8.2.4	Elemente, die das Austenitgebiet erweitern	180
8.2.5	Elemente, die das Austenitgebiet verkleinern	182
8.2.6	Wirkung mehrerer Elemente im Stahl	184
8.3	Einfluß der Legierungselemente auf das Härteverhalten	185
8.3.1	Allgemeines	185

8.3.2	Einfluß der Legierungselemente auf die Einhärtung	185
8.3.3	Einfluß der Legierungselemente auf die ZTU-Schaubilder	185
8.3.4	Legierte Werkzeugstähle	187
8.4	Einfluß der Legierungselemente auf die Schweißbeignung	190
9	Nichteisenmetalle	192
9.1	Allgemeines	192
9.2	Bezeichnung von NE-Metallen und Legierungen	192
9.2.1	Allgemeines	192
9.2.2	Legierungen	193
9.2.3	Zustandsbezeichnungen	193
9.2.4	Knetlegierungen	194
9.2.5	Gußlegierungen	194
9.3	Aluminium	195
9.3.1	Vorkommen und Gewinnung	195
9.3.2	Einteilung der Aluminium-Knetwerkstoffe	196
9.3.3	Unlegiertes Aluminium, Serie 1000	197
9.3.4	Nicht aushärtbare Legierungen	198
9.3.5	Aushärtbare Legierungen	199
9.3.6	Aluminium-Gußlegierungen	200
9.3.7	Aushärten der Aluminium-Legierungen	202
9.3.8	Neuentwicklungen	204
9.4	Kupfer	204
9.4.1	Vorkommen und Gewinnung	204
9.4.2	Eigenschaften, Verwendung	205
9.4.3	Niedriglegiertes Kupfer	207
9.4.4	Allgemeines zu den Kupfer-Legierungen	207
9.4.5	Kupfer-Zink-Legierungen	208
9.4.6	Kupfer-Zinn-Legierungen	210
9.4.7	Kupfer-Aluminium-Legierungen	211
9.4.8	Kupfer-Nickel-Legierungen	212
9.4.9	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	213
9.5	Magnesium	213
9.6	Titan	214
9.6.1	Vorkommen und Gewinnung	214
9.6.2	Eigenschaften und Anwendung	215
9.6.3	Titanlegierungen	215
9.7	Druckgußwerkstoffe	216
9.8	Lagerwerkstoffe	218
10	Pulvermetallurgie, Sintermetalle, Keramische Stoffe	221
10.1	Überblick und Einordnung	221
10.2	Das pulvermetallurgische Fertigungsverfahren	222
10.2.1	Herstellung der Pulver	223

10.2.2	Formgebung und Verdichten	224
10.2.3	Sintern	225
10.2.4	Nachverdichten, Kalibrieren	227
10.2.5	Nachbehandlung der Sinterteile	227
10.3	Werkstoffe	228
10.3.1	Überblick	228
10.3.2	Klassifizierung, Normung	230
10.4	Sprühkompaktieren (OSpray-Verfahren)	232
10.5	Keramische Werkstoffe	233
10.5.1	Eigenschaften keramischer Werkstoffe	233
10.5.2	Werkstoffsorten	235
10.5.3	Neue Verfahren zur Herstellung keramischer Pulver	236
10.5.4	Vergleich einiger Strukturkeramiken	238
11	Kunststoffe	239
11.1	Allgemeines	239
11.1.1	Vergleich Metall/Kunststoff	239
11.1.2	Kunststoffmoleküle	241
11.2	Die Entstehung der Makromoleküle	241
11.2.1	Natürlich vorkommende Makromoleküle	241
11.2.2	Kohlenwasserstoffe (KW)	241
11.2.3	Synthetische Makromoleküle	243
11.3	Molekülstruktur und Einfluß auf die Eigenschaften	248
11.3.1	Bindungskräfte	248
11.3.2	Einfluß der Kettenlänge	249
11.3.3	Einfluß der Gestalt	250
11.3.4	Einfluß der Ordnung von Fadenmolekülen in Thermoplasten	250
11.4	Einfluß von Zusätzen	252
11.5	Duroplaste	252
11.5.1	Allgemeines	252
11.5.2	Duroplaste für Kalthärtung	253
11.5.3	Duroplastverarbeitung	254
11.6	Thermoplaste (Plastomere)	256
11.6.1	Thermische Eigenschaften	256
11.6.2	Mechanische Eigenschaften	258
11.6.3	Langzeiteigenschaften	259
11.6.4	Thermoplastverarbeitung	262
11.7	Übersicht über die wichtigsten Thermoplaste	263
12	Festigkeitsbeanspruchung und werkstofftechnische Maßnahmen	272
12.1	Allgemeines	272
12.2	Erhöhung der Kristallfestigkeit	272
12.3	Festigkeitssteigerung bei Baustählen	274
12.4	Spezifische Festigkeiten	274

12.5	Festigkeit bei thermischer Beanspruchung	276
12.5.1	Allgemeines	276
12.5.2	Zeitfestigkeiten	277
12.5.3	Warmfeste Baustähle	277
12.5.4	Hitzebeständige Stähle	278
13	Korrosionsbeanspruchung und Korrosionsschutz	279
13.1	Korrosion und Reaktionsarten (DIN 50 900)	279
13.1.1	Chemische Reaktion	280
13.1.2	Metallphysikalische Reaktion	280
13.1.3	Elektrochemische Reaktion	280
13.2	Korrosionselemente	280
13.2.1	Elektrochemische Spannungsreihe	280
13.2.2	Galvanisches Element	281
13.2.3	Korrosionselemente	281
13.3	Korrosionserscheinungen und -größen	282
13.4	Weitere Korrosionsarten	283
13.5	Korrosionsprodukte	283
13.6	Korrosion mit anderen Beanspruchungsarten überlagert	284
13.6.1	Korrosion und Festigkeitsbeanspruchung	284
13.6.2	Korrosion und tribologische Beanspruchung	285
13.7	Korrosionsschutz	286
13.7.1	Korrosionsschutz durch Eigenschaftsänderung oder Werkstoffwahl	286
13.7.2	Veränderung der elektrischen Verhältnisse (Kathodischer Korrosionsschutz)	288
13.7.3	Trennung von Metall und Korrosionsmittel durch Schutzschichten	289
14	Tribologische Beanspruchung und werkstofftechnische Maßnahmen	290
14.1	Allgemeines	290
14.1.1	Begriffsklärung	290
14.1.2	Der Bereich der Tribologie	291
14.1.3	Das tribologische System	291
14.2	Reibung, Schmierung	293
14.2.1	Allgemeines	293
14.2.2	Festkörperreibung (Trocken-oder Grenzreibung)	294
14.2.3	Flüssigkeitsreibung	295
14.2.4	Übersicht Reibungszustände	296
14.2.5	Stribeck-Kurve	296
14.3	Schmierstoffe	297
14.3.1	Wichtige Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Schmiermitteln	297
14.3.2	Schmieröle, Sonderöle, Syntheseöle	302

14.3.3	Schmierfette	306
14.3.4	Festschmierstoffe	308
14.4	Verschleiß	309
14.4.1	Verschleißmechanismen (DIN 50 320)	309
14.4.2	Verschleißarten	310
14.4.3	Verschleißkenngrößen	311
14.4.4	Werkstoffe für verschleißgefährdete Tribosysteme	313
14.4.5	Verschleißschutz durch Oberflächenbeschichtung	315
14.4.6	Wärmebehandlungsverfahren für die Partner in Tribosystemen	315
15	Verbundstrukturen und Verbundwerkstoffe	316
15.1	Begriffsklärung	316
15.1.1	Verbundkonstruktionen	316
15.1.2	Werkstoffverbunde	316
15.1.3	Verbundwerkstoffe	317
15.1.4	Struktur und Einteilung	318
15.2	Schichtverbundwerkstoffe	319
15.3	Faserverbundwerkstoffe	319
15.3.1	Faserwerkstoffe und Eigenschaften	319
15.3.2	Faserverstärkte Polymere	321
15.4	Teilchenverbundwerkstoffe	321
15.5	Durchdringungsverbundwerkstoffe	322
15.6	Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe MMC	322
15.7	Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffe CMC	324
16	Werkstoffprüfung	326
16.1	Aufgaben, Abgrenzung	326
16.2	Prüfung von Werkstoffkennwerten	327
16.3	Messung der Härte	327
16.3.1	Härteprüfung nach Brinell DIN EN 10003-1	328
16.3.2	Härteprüfung nach Vickers DIN 50 133	330
16.3.3	Härteprüfung nach Rockwell DIN EN 10109-1	331
16.3.4	Vergleich der Härtewerte	333
16.3.5	Dynamische Härteprüfung nach Shore	333
16.4	Prüfung der Festigkeit bei statischer Belastung	333
16.4.1	Allgemeines Bruchverhalten	334
16.4.2	Der Zugversuch DIN EN 10002	335
16.5	Prüfung der Festigkeit bei dynamischer Belastung	341
16.5.1	Allgemeines Verhalten	341
16.5.2	Dynamische Belastung	342
16.5.3	Dauerschwingfestigkeiten	344
16.5.4	Dauerschwingversuche DIN 50 100	344
16.5.5	Dauerfestigkeitsschaubild	346
16.5.6	Dauerfestigkeit und Einflußgrößen	347

16.6	Prüfung der Zähigkeit	347
16.6.1	Spannungszustände	348
16.6.2	Kerbschlagbiegeversuch DIN EN 10045-1	349
16.6.3	Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve	350
16.7	Prüfung von Verarbeitungseigenschaften (technologische Versuche)	351
16.8	Untersuchung des Gefüges	353
16.8.1	Mikroskopische Untersuchungen	353
16.8.2	Makroskopische Untersuchungen	354
16.9	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen und Qualitätskontrolle	354
16.9.1	Allgemeines	354
16.9.2	Eindringverfahren (Penetrierverfahren)	355
16.9.3	Magnetische Prüfungen	355
16.9.4	Magnetinduktive Prüfungen (Wirbelstromprüfung)	356
16.9.5	Ultraschallprüfung	356
16.9.6	Röntgen-/Gamma-Strahlen-Prüfung	358
Anhang A: Die systematische Bezeichnung der Werkstoffe		361
A.1	Kennzeichnung der Stähle	361
A.1.1	Bezeichnungssystem für Stähle	361
A.1.2	Aufbau des Kurznamens	361
A.1.3	Stähle für den Stahlbau	362
A.1.4	Stähle für Druckbehälter	362
A.1.5	Stähle für den Maschinenbau	363
A.1.6	Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus höherfesten Stählen zum Kaltumformen	363
A.1.7	Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) zum Kaltumformen (weiche Stähle)	363
A.1.8	Nach der chemischen Zusammensetzung bezeichnete Stähle	363
A.1.8.1	Unlegierte Stähle mit Mn-Gehalt 1 %	364
A.1.8.2	Niedriglegierte Stähle	364
A.1.8.3	Hochlegierte Stähle	364
A.1.8.4	Schnellarbeitsstähle	364
A.1.9	Nummernsystem für Stähle	365
A.2	Bezeichnung der Eisen-Gußwerkstoffe	367
A.3	Bezeichnung der NE-Metalle	368
A.3.1	Allgemeines	368
A.3.2	Bezeichnung von Aluminium und -legierungen	368
A.3.3	Bezeichnung von Kupfer und -legierungen	369
A.4	Bezeichnung der Kunststoffe	370
Bildquellenverzeichnis		371
Sachwortverzeichnis		372