

Wolfgang Weißbach

Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung

Mit über 300 Abbildungen und 300 Tafeln

14., verbesserte Auflage

Inhaltsverzeichnis

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
Metalle und Legierungen	31
2.1 Grundlagen	31
2.1.1 Häufigkeit	31
2.1.2 Metallische Bindung	32
2.1.3 Metalleigenschaften	33
2.1.4 Kristallstrukturen der Metalle	35
2.1.5 Gitterfehler	40
2.1.6 Entstehung des Gefüges	42

2.2	Verformung und mechanische Eigenschaften	46
2.2.1	Verformung bei Raumtemperatur.	46
2.2.2	Verfestigung durch Gitterfehler.	49
2.3	Vorgänge im Metallgitter bei höheren Temperaturen (thermisch aktivierte Prozesse).	54
2.3.1	Allgemeines.	54
2.3.2	Kristallerholung und Rekristallisation	55
2.3.3	Kornvergrößerung	56
2.3.4	Warmumformung	58
2.3.5	Diffusion.	59
2.4	Legierungen (Zweistofflegierungen).	61
2.4.1	Begriffe.	61
2.4.2	Zustandsdiagramme, Allgemeines	63
2.4.3	Zustandsdiagramm mit vollkommener Mischbarkeit der Komponenten (Grundtyp I).	63
2.4.4	Allgemeine Eigenschaften der Mischkristallgefüge.	64
2.4.5	Eutektische Legierungssysteme (Grundtyp II).	65
2.4.6	Allgemeine Eigenschaften der eutektischen Legierungen.	67
2.4.7	Ausscheidungen aus übersättigten Mischkristallen.	69
2.4.8	Zustandsdiagramm mit intermetallischen Phasen.	70
2.4.9	Übung zur Auswertung eines Zustandsdiagrammes.	71
2.4.10	Vergleich von homogenen und heterogenen Legierungen.	72
2.4.11	Übersicht über Phasenumwandlungen im festen Zustand.	73
3	Die Legierung Eisen-Kohlenstoff	74
3.1	Abkühlkurve 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	Austenit zerfall	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-Umwandlungs-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 Einhaltung	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	Unlegiertes Kupfer.	204
9.4.2	Normen für Kupfer und Kupferlegierungen.	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.	212
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	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 Häftewerte	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