

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
1.3 Wie lassen sich die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe erklären?	7
1.3.1 Atombau und Periodensystem (PSE)	8
1.3.2 Bindungsart	9
1.3.3 Materialaufbau	11
1.3.4 Werkstoffeigenschaften	14
1.4 Anforderungen an Werkstoffe	17
1.4.1 Anforderungsprofil	17
1.4.2 Eigenschaftsprofil	18
2 Metallische Werkstoffe	19
2.1 Metallkunde	19
2.1.1 Vorkommen	19
2.1.2 Metallbindung	19
2.1.3 Metalleigenschaften	21
2.1.4 Die Kristallstrukturen der Metalle (Idealkristalle)	24
2.1.5 Entstehung des Gefüges und seine Ausrichtungen	28
2.1.6 Verformung am Idealkristall (Modellvorstellung)	32
2.2 Struktur und Verformung der Realkristalle	37
2.2.1 Kristallfehler	37
2.2.2 Verformung der Realkristalle und Veränderung der Eigenschaften	40
2.3 Verfestigungsmechanismen	40
2.3.1 Mischkristallverfestigung	41
2.3.2 Verformungsverfestigung	42
2.3.3 Korngrenzenverfestigung (Feinkorn)	43
2.3.4 Teilchenverfestigung	44
2.3.5 Verfestigungsmechanismen kombiniert	47
2.4 Vorgänge im Metallgitter bei höheren Temperaturen	47
2.4.1 Allgemeines	47
2.4.2 Kristallerholung und Rekristallisation	49
2.4.3 Kornvergrößerung (-wachstum)	51
2.4.4 Warmumformung	52
2.4.5 Diffusion	53
2.4.6 Werkstoffverhalten bei höheren Temperaturen unter Beanspruchung	55

2.5	Legierungen (Zweistofflegierungen)	59
2.5.1	Begriffe	59
2.5.2	Zustandsdiagramme, Allgemeines	63
2.5.3	Zustandsdiagramm mit vollkommener Mischbarkeit der Komponenten	63
2.5.4	Allgemeine Eigenschaften der Mischkristall-Legierungen	65
2.5.5	Eutektische Legierungssysteme (Grundtyp II)	66
2.5.6	Allgemeine Eigenschaften der eutektischen Legierungen	67
2.5.7	Ausscheidungen aus übersättigten Mischkristallen	69
2.5.8	Zustandsdiagramm mit intermetallischen Phasen	70
2.5.9	Übung: Auswertung eines Zustandsdiagrammes, Abkühlverlauf einer Cu-Zn-Legierung (64,5 % Cu)	71
2.5.10	Vergleich von homogenen und heterogenen Legierungen	72
2.5.11	Übersicht über Phasenumwandlungen im festen Zustand	73
3	Die Legierung Eisen-Kohlenstoff	74
3.1	Abkühlkurve und Kristallarten des Reineisens	74
3.2	Erstarrungsformen	76
3.3	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD)	78
3.3.1	Erstarrungsvorgänge	78
3.3.2	Die Umwandlungen im festen Zustand	79
3.4	Einfluss des Kohlenstoffs auf die Legierungseigenschaften	86
3.4.1	Mechanische Eigenschaften	86
3.4.2	Technologische Eigenschaften	87
4	Stähle	88
4.1	Erzeugung und Klassifizierung	88
4.1.1	Allgemeines	88
4.1.2	Ausgangsstoffe und Aufgaben der Stahlerzeugung	88
4.1.3	Rohstahlerzeugung	88
4.1.4	Sekundärmetallurgie	90
4.1.5	Vergießen und Erstarren des Stahles	91
4.1.6	Eisenbegleiter und Wirkung auf Gefüge und Stahleigenschaften	92
4.1.7	Einfluss der Legierungselemente	94
4.1.8	Einteilung der Stähle	97
4.2	Stähle für allgemeine Verwendung	99
4.2.1	Anforderungsprofil	99
4.2.2	Baustähle nach DIN EN 10025	100
4.3	Baustähle höherer Festigkeit	102
4.3.1	Die Erhöhung der Festigkeit	102
4.3.2	Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, nicht vergütet	103
4.3.3	Vergütete schweißgeeignete Feinkornbaustähle, DIN EN 10025-6/09 Blech und Breitflachstahl (DIN EN 10137-2 Z)	104
4.4	Stähle mit besonderen Eigenschaften	104
4.4.1	Kaltzähe Stähle	104
4.4.2	Wetterfeste Baustähle, DIN EN 10025-5/05	105
4.4.3	Austenitische Stähle	105
4.4.4	Ferritische Stähle	106
4.4.5	Stähle für Einsatz bei hohen Temperaturen	107

4.5	Stähle für bestimmte Fertigungsverfahren	109
4.5.1	Automatenstähle	109
4.5.2	Stähle zum Kaltumformen	109
4.6	Stähle für bestimmte Bauteile	113
4.6.1	Wälzlagerstähle	113
4.6.2	Federstähle	114
4.7	Werkzeugstähle	115
4.7.1	Allgemeines	115
4.7.2	Kaltarbeitsstähle	117
4.7.3	Warmarbeitsstähle	118
4.7.4	Kunststoff-Formenstähle	119
4.7.5	Schnellarbeitsstähle (HS-Stähle)	120
4.8	Stahlguss	121
4.8.1	Allgemeines	121
4.8.2	Stahlguss für allgemeine Verwendung	122
4.8.3	Weitere Stahlgusswerkstoffe	122
5	Wärmebehandlung des Stahles	124
5.1	Allgemeines	124
5.1.1	Einteilung der Verfahren	124
5.1.2	Zeit-Temperatur-Folgen	125
5.1.3	Austenitisierung (ZTA-Schaubilder)	126
5.2	Glühverfahren	128
5.2.1	Normalglühen	128
5.2.2	Glühen auf beste Verarbeitungseigenschaften	129
5.2.3	Spannungarmglühen	131
5.2.4	Diffusionsglühen	132
5.2.5	Rekristallisationsglühen	133
5.3	Härt(en) und Vergüten	133
5.3.1	Allgemeines	133
5.3.2	Austenitzerfall	134
5.3.3	Martensit, Struktur und Bedingungen für die Entstehung	135
5.3.4	Härtbarkeit der Stähle	137
5.3.5	Verfahrenstechnik	139
5.3.6	Härteverzug und Gegenmaßnahmen	144
5.3.7	Zeit-Temperatur-Umwandlung (ZTU-Schaubilder)	145
5.3.8	Vergüten	148
5.4	Aushärt(en)	152
5.4.1	Allgemeines	152
5.4.2	Verfahren	153
5.4.3	Ausscheidungshärtende Stähle	154
5.4.4	Vergleich Härt(en)/Vergüten und Aushärt(en)	155
5.4.5	Ausscheidungsvorgänge mit negativen Auswirkungen	155
5.5	Thermomechanische Verfahren	156
5.5.1	Allgemeines	156
5.5.2	Thermomechanische Behandlung (TM)	157
5.5.3	Austenitformhärt(en)	157
5.5.4	Weitere Anwendungen	157

5.6	Verfahren der Oberflächenhärtung	159
5.6.1	Überblick	159
5.6.2	Randschichthärtungen	159
5.6.3	Einsatzhärten	162
5.6.4	Nitrieren, Nitrocarburieren	168
5.6.5	Weitere Verfahren (Auswahl)	172
5.6.6	Mechanische Verfahren	173
6	Eisen-Gusswerkstoffe	175
6.1	Übersicht und Einteilung	175
6.1.1	Vorteile der Gusskonstruktionen	175
6.1.2	Einteilung der Gusswerkstoffe	177
6.2	Allgemeines über die Gefüge- und Graphitausbildung bei Gusseisen	178
6.2.1	Gefügeausbildung	178
6.2.2	Graphitausbildung	179
6.3	Gusseisen mit Lamellengraphit	180
6.4	Gusseisen mit Kugelgraphit	182
6.5	Temperguss	184
6.6	Gusseisen mit Vermiculargraphit	187
6.7	Sonderguss	188
7	Nichteisenmetalle	191
7.1	Allgemeines	191
7.2	Bezeichnung von NE-Metallen und -Legierungen	191
7.2.1	Übersicht	191
7.2.2	Werkstoff	192
7.2.3	Zustandsbezeichnungen	192
7.2.4	Knetlegierungen	193
7.2.5	Gusslegierungen	193
7.3	Aluminium	194
7.3.1	Vorkommen und Gewinnung	194
7.3.2	Einteilung der Al-Knetwerkstoffe	195
7.3.3	Unlegiertes Aluminium, Serie 1000	196
7.3.4	Nicht aushärtbare Legierungen	197
7.3.5	Aushärtbare Legierungen	198
7.3.6	Aluminium-Gusslegierungen	200
7.3.7	Aushärten der Aluminium-Legierungen	201
7.3.8	Neuentwicklungen	203
7.4	Kupfer	203
7.4.1	Vorkommen und Gewinnung	203
7.4.2	Eigenschaften, Verwendung	204
7.4.3	Normen für Kupfer und Kupferlegierungen	205
7.4.4	Niedriglegiertes Kupfer	206
7.4.5	Allgemeines zu den Kupfer-Legierungen	206
7.4.6	Kupfer-Zink-Legierungen	207
7.4.7	Kupfer-Zinn-Legierungen	209
7.4.8	Kupfer-Aluminium-Legierungen	210
7.4.9	Kupfer-Nickel-Legierungen	211
7.4.10	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	212

7.5	Magnesium	212
7.5.1	Vorkommen und Gewinnung	212
7.5.2	Eigenschaften von Magnesium	213
7.6	Titan	217
7.6.1	Metallgewinnung	217
7.6.2	Eigenschaften und Anwendung	217
7.6.3	Titanlegierungen (DIN 17 851/90)	218
7.7	Nickel (DIN 17743)	220
7.7.1	Rein-Nickel	220
7.7.2	Niedrig legiertes Nickel	220
7.7.3	Ni-Basis-Legierungen	220
7.8	Druckgusswerkstoffe	224
8	Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe	228
8.1	Einteilung und Abgrenzung	228
8.2	Struktur und Eigenschaften keramischer Stoffe	228
8.2.1	Thermoschockbeständigkeit	230
8.3	Bearbeitung der Werkstoffe	231
8.4	Werkstoffsorten	232
8.4.1	Oxidische Werkstoffe	232
8.4.2	Nichtoxidische Werkstoffe	234
8.5	Neue Verfahren zur Herstellung der Pulver-Ausgangsstoffe	238
8.6	Vergleich einiger anorganisch-nichtmetallischer Werkstoffe	239
9	Kunststoffe (Polymere)	241
9.1	Allgemeines	241
9.1.1	Entwicklung und Bedeutung	241
9.1.2	Begriffe und Einteilung der Polymere	241
9.1.3	Polymereigenschaften und ihre Prüfung	243
9.2	Monomere Stoffe und Entstehung der Polymere	245
9.2.1	Kohlenstoffatome	245
9.2.2	Kettenförmige Kohlenwasserstoffe (Aliphaten oder aliphatische KW)	245
9.2.3	Ringförmige Kohlenwasserstoffe (Aromaten)	246
9.2.4	Herstellung synthetischer Makromoleküle, Übersicht	247
9.2.5	Polykondensation	247
9.2.6	Polymerisation	248
9.2.7	Polyaddition	249
9.2.8	Systematische Benennung der Polymere	250
9.3	Strukturen der Makromoleküle	251
9.3.1	Bindungskräfte	251
9.3.2	Einfluss der Molekülmasse (Kettenlänge)	251
9.3.3	Gestalt der Makromoleküle	252
9.3.4	Kristallisation	254
9.4	Gefügeveränderungen bei Polymeren	255
9.4.1	Polymergemische, Polyblends	255
9.4.2	Zusatzzstoffe und Einfluss auf die Eigenschaften	256
9.4.3	Faserverstärkung	256
9.5	Duroplaste	258
9.5.1	Allgemeines	258

9.5.2	Formmassetypen	258
9.5.3	Duroplastverarbeitung	260
9.6	Thermoplaste	261
9.6.1	Thermisches Verhalten	261
9.6.2	Langzeiteigenschaften der Kunststoffe	263
9.6.3	Thermoplastverarbeitung	266
9.6.4	Übersicht über die wichtigsten Thermoplaste	267
9.7	Elastomere	275
9.8	Statistische Daten und Eigenschaftsvergleiche	277
10	Verbundstrukturen und Verbundwerkstoffe	279
10.1	Begriffsklärung	279
10.1.1	Verbundkonstruktionen	279
10.1.2	Werkstoffverbunde	279
10.1.3	Verbundwerkstoffe	280
10.1.4	Struktur und Einteilung der Verbundwerkstoffe	281
10.2	Schichtverbundwerkstoffe	282
10.3	Faserverbundwerkstoffe (FVW)	283
10.3.1	Faserwerkstoffe und Eigenschaften	283
10.3.2	Faserverstärkte Polymere	284
10.4	Teilchenverbundwerkstoffe	285
10.5	Durchdringungsverbundwerkstoffe	286
10.6	Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe (MMC)	287
10.6.1	Allgemeines	287
10.6.2	Metallmatrix-Faserverbunde	288
10.6.3	Metallmatrix-Teilchenverbunde	288
10.6.4	Metallmatrix-Durchdringungsverbunde	290
10.6.5	Metallschäume	290
10.7	Keramik-Matrix-Verbunde (CMC)	291
10.7.1	Allgemeines	291
10.7.2	Faserverbundkeramik	291
10.7.3	Durchdringungsverbundkeramik	292
11	Werkstoffe besonderer Herstellung oder Eigenschaften	294
11.1	Pulvermetallurgie, Sintermetalle	294
11.1.1	Überblick und Einordnung	294
11.1.2	Herstellung der Pulver	296
11.1.3	Formgebung und Verdichten	297
11.1.4	Sintern	298
11.1.5	Nachbehandlung der Sinterteile	299
11.1.6	Werkstoffe	300
11.1.7	Klassifizierung, Normung	303
11.1.8	Sprühkomprimieren (Spray Forming)	304
11.2	Schichtwerkstoffe und Schichtherstellung	306
11.2.1	Begriffe, Abgrenzung	306
11.2.2	Verfahrensübersicht	307
11.2.3	Thermisches Spritzen	308
11.2.4	Auftragschweißen und -löten	310
11.2.5	Abscheiden aus der Gasphase	311

11.2.6	Beschichten aus dem ionisierten Zustand	315
11.3	Lager- und Gleitwerkstoffe	316
11.3.1	Allgemeines	316
11.3.2	Lagermetalle	317
11.3.3	Weitere Lagerwerkstoffe, selbstschmierende Lager	318
11.4	Werkstoffe mit steuerbaren Eigenschaftsänderungen	319
11.4.1	Begriffe	319
11.4.2	Piezokeramik	320
11.4.3	Formgedächtnis-Legierungen (FGL)	321
11.4.4	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 (DIN EN ISO 6506-1/05)	367
15.3.2	Härteprüfung nach Vickers (DIN EN ISO 6507-1/05)	370
15.3.3	Härteprüfung nach Rockwell (DIN EN ISO 6508-1/05)	370
15.3.4	Vergleich der Härtewerte	372
15.3.5	Dynamische Härteprüfung nach Shore (EN ISO 868/03)	372
15.3.6	Schlaghärteprüfung (Poldi-Hammer)	373
15.4	Prüfung der Festigkeit bei statischer Belastung	373
15.4.1	Der Zugversuch (DIN EN ISO 6892-1/09)	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-Belastung 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 ISO 148/11)	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	Wirbelstromprüfung (DIN EN ISO 15549/10)	398
15.9.5	Ultraschallprüfung (DIN EN 583, Teil 1–6/97–08)	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 10027-1/05)	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