
Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegende Begriffe und Zusammenhänge	1
1.1	Gegenstand und Bedeutung der Werkstoffkunde	1
1.1.1	Das Fachgebiet Werkstoffe	1
1.2	Stellung und Bedeutung der Werkstoffkunde in der Technik	3
1.3	Entwicklungsrichtungen der Werkstofftechnik	6
1.3.1	Bessere Nutzung von Werkstoff und Energie (Material- und Energieeffizienz)	7
1.3.2	Oberflächenbehandlungen, Nanotechnologie	7
1.4	Wie lassen sich die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe erklären?	7
1.4.1	Atombau und Periodensystem (PSE)	8
1.4.2	Bindungsart	10
1.4.3	Materialaufbau	11
1.4.4	Werkstoffeigenschaften	17
1.5	Anforderungen an Werkstoffe	22
1.5.1	Anforderungsprofil	22
1.5.2	Eigenschaftsprofil	23
2	Metallische Werkstoffe	25
2.1	Metallkunde	25
2.1.1	Vorkommen	25
2.1.2	Metallbindung	26
2.1.3	Metalleigenschaften	29
2.1.4	Die Kristallstrukturen der Metalle (Idealkristalle)	31
2.1.5	Entstehung des Gefüges	39
2.1.6	Verformung am Idealkristall (Modellvorstellung)	47
2.2	Struktur und Verformung der Realkristalle	51
2.2.1	Kristallfehler	51
2.2.2	Verformung der Realkristalle und Veränderung der Eigenschaften	56

2.3	Verfestigungsmechanismen	57
2.3.1	Mischkristallverfestigung	58
2.3.2	Kaltverfestigung (Verformungsverfestigung)	60
2.3.3	Feinkornverfestigung (Korngrenzenverfestigung)	63
2.3.4	Dispersionsverfestigung (Teilchen-, Ausscheidungs-)	64
2.3.5	Verfestigungsmechanismen kombiniert	68
2.4	Vorgänge im Metallgitter bei höheren Temperaturen (Thermisch aktivierte Prozesse)	69
2.4.1	Allgemeines	69
2.4.2	Kristallerholung und Rekristallisation	72
2.4.3	Kornvergrößerung (-wachstum)	76
2.4.4	Warmumformung	77
2.4.5	Diffusion	79
2.4.6	Werkstoffverhalten bei höheren Temperaturen unter Beanspruchung	83
2.5	Legierungen (Zweistofflegierungen)	87
2.5.1	Begriffe	87
2.5.2	Zustandsdiagramme, Allgemeines	92
2.5.3	Zustandsdiagramm mit vollkommener Mischbarkeit der Komponenten	94
2.5.4	Allgemeine Eigenschaften der Mischkristalllegierungen	97
2.5.5	Eutektische Legierungssysteme (Grundtyp II)	97
2.5.6	Allgemeine Eigenschaften der eutektischen Legierungen	99
2.5.7	Ausscheidungen aus übersättigten Mischkristallen	103
2.5.8	Zustandsdiagramm mit Intermetallischen Phasen	105
2.5.9	Übung: Auswertung eines Zustandsdiagrammes, Abkühlverlauf einer Cu-Zn-Legierung (64,5 % Cu)	106
2.5.10	Vergleich von homogenen und heterogenen Legierungen	108
2.5.11	Übersicht über Phasenumwandlungen im festen Zustand	108
3	Die Legierung Eisen-Kohlenstoff	111
3.1	Abkühlkurve und kristalline Phasen des Reineisens	112
3.2	Erstarrungsformen	115
3.3	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD)	117
3.3.1	Erstarrungsvorgänge	118
3.3.2	Die Umwandlungen im festen Zustand	120
3.4	Einfluss des Kohlenstoffs auf die Legierungseigenschaften	129
3.4.1	Mechanische Eigenschaften	129
3.4.2	Technologische Eigenschaften	130

4	Stähle	131
4.1	Erzeugung und Klassifizierung	131
4.1.1	Allgemeines	131
4.1.2	Ausgangsstoffe und Aufgaben der Stahlerzeugung	131
4.1.3	Rohstahlerzeugung	132
4.1.4	Sekundärmetallurgie	134
4.1.5	Vergießen und Erstarren des Stahles	135
4.1.6	Eisenbegleiter und Wirkung auf Gefüge und Stahleigenschaften	137
4.1.7	Einfluss der Legierungselemente	139
4.1.8	Einteilung der Stähle	146
4.2	Stähle für allgemeine Verwendung	148
4.2.1	Anforderungsprofil	148
4.2.2	Baustähle nach DIN EN 10025/04	150
4.3	Baustähle höherer Festigkeit	152
4.3.1	Die Erhöhung der Festigkeit	153
4.3.2	Nicht vergütete schweißgeeignete Feinkornbaustähle	154
4.3.3	Vergütete schweißgeeignete Feinkornbaustähle, DIN EN 10025-6/04	154
4.4	Stähle mit besonderen Eigenschaften	156
4.4.1	Kaltzähe Stähle	156
4.4.2	Wetterfeste Baustähle DIN EN 10025-5/04	157
4.4.3	Austenitische Stähle	157
4.4.4	Ferritische Stähle	159
4.4.5	Stähle für Einsatz bei hohen Temperaturen	161
4.5	Stähle für bestimmte Fertigungsverfahren	163
4.5.1	Automatenstähle	163
4.5.2	Stähle zum Kaltumformen	164
4.6	Stähle für bestimmte Bauteile	169
4.6.1	Wälzlagerstähle	169
4.6.2	Federstähle	170
4.7	Werkzeugstähle	174
4.7.1	Allgemeines	174
4.7.2	Kaltarbeitsstähle	177
4.7.3	Warmarbeitsstähle	178
4.7.4	Kunststoffformenstähle	179
4.7.5	Schnellarbeitsstähle (HS-Stähle)	180
4.8	Stahlguss	182
4.8.1	Allgemeines	182
4.8.2	Stahlguss für allgemeine Verwendung	183
4.8.3	Weitere Stahlgusswerkstoffe	185

5	Wärmebehandlung der Stähle	187
5.1	Allgemeines	187
5.1.1	Einteilung der Verfahren	187
5.1.2	Zeit-Temperatur-Folgen	188
5.1.3	Austenitisierung (ZTA-Schaubilder)	189
5.2	Glühverfahren	192
5.2.1	Normalglühen	193
5.2.2	Glühen auf beste Verarbeitungseigenschaften	195
5.2.3	Spannungsarmglühen	198
5.2.4	Diffusionsglühen	199
5.2.5	Rekristallisationsglühen	200
5.3	Härten und Vergüten	202
5.3.1	Allgemeines	202
5.3.2	Austenitzerfall	202
5.3.3	Martensit, Struktur und Bedingungen für die Entstehung	204
5.3.4	Härtbarkeit der Stähle	207
5.3.5	Verfahrenstechnik	210
5.3.6	Härteverzug und Gegenmaßnahmen	216
5.3.7	Zeit-Temperatur-Umwandlung (ZTU-Schaubilder)	219
5.3.8	Vergüten	223
5.4	Aushärten	229
5.4.1	Allgemeines	229
5.4.2	Verfahren	229
5.4.3	Ausscheidungshärtende Stähle	231
5.4.4	Vergleich Härten/Vergüten und Aushärten	232
5.4.5	Ausscheidungsvorgänge mit negativen Auswirkungen	233
5.5	Thermomechanische Verfahren	234
5.5.1	Allgemeines	234
5.5.2	Thermomechanische Behandlung (TM)	236
5.5.3	Austenitformhärten	236
5.5.4	Weitere Anwendungen	237
5.6	Verfahren der Oberflächenhärtung	238
5.6.1	Überblick	238
5.6.2	Randschichthärten	239
5.6.3	Einsatzhärten	244
5.6.4	Nitrieren, Nitrocarburieren	251
5.6.5	Weitere Verfahren (Auswahl)	256
5.6.6	Mechanische Verfahren	257
6	Eisen-Gusswerkstoffe	261
6.1	Übersicht und Einteilung	261
6.1.1	Vorteile der Gusskonstruktionen	262

6.1.2	Einteilung der Gusswerkstoffe	264
6.2	Allgemeines über die Gefüge- und Graphitabildung bei Gusseisen	265
6.2.1	Gefügeabildung	265
6.2.2	Graphitabildung	267
6.3	Gusseisen mit Lamellengraphit GJL (DIN EN 1561/11)	268
6.4	Gusseisen mit Kugelgraphit GJS (DIN EN 1563/11)	271
6.5	Temperguss GJMW/GJMB (DIN EN 1562/12)	274
6.6	Gusseisen mit Vermiculargraphit	278
6.7	Sonderguss	280
7	Nichteisenmetalle	285
7.1	Allgemeines	285
7.2	Bezeichnung von NE-Metallen und -Legierungen	286
7.2.1	Übersicht	286
7.2.2	Werkstoff	287
7.2.3	Zustandsbezeichnungen	287
7.2.4	Knetlegierungen	288
7.2.5	Gusslegierungen	289
7.3	Aluminium	290
7.3.1	Vorkommen und Gewinnung	290
7.3.2	Einteilung der Al-Knetwerkstoffe	292
7.3.3	Unlegiertes Aluminium, Serie 1000	293
7.3.4	Aluminiumknetlegierungen	294
7.3.4.1	Nicht aushärtbare Legierungen	295
7.3.4.2	Aushärtbare Legierungen	297
7.3.5	Aluminium-Gusslegierungen	298
7.3.6	Aushärten der Aluminium-Legierungen	300
7.3.7	Neuentwicklungen	303
7.4	Kupfer	303
7.4.1	Vorkommen und Gewinnung	303
7.4.2	Eigenschaften, Verwendung	304
7.4.3	Normen für Kupfer und Kupferlegierungen	306
7.4.4	Niedriglegiertes Kupfer	306
7.4.5	Allgemeines zu den Kupfer-Legierungen	308
7.4.6	Kupfer-Zink-Legierungen	310
7.4.7	Kupfer-Zinn-Legierungen	312
7.4.8	Kupfer-Aluminium-Legierungen	314
7.4.9	Kupfer-Nickel-Legierungen	316
7.4.10	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen	317
7.5	Magnesium	318
7.5.1	Vorkommen und Gewinnung	318
7.5.2	Eigenschaften von Magnesium	319

7.6	Titan	324
7.6.1	Metallgewinnung	325
7.6.2	Eigenschaften und Anwendung	325
7.6.3	Titanlegierungen (DIN 17 851/90)	326
7.7	Nickel (DIN 17743/02)	329
7.7.1	Unlegiertes Nickel	329
7.7.2	Niedrig legiertes Nickel	330
7.7.3	Ni-Basis-Legierungen	331
7.8	Druckgusswerkstoffe	336
8	Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe	341
8.1	Einteilung und Abgrenzung	341
8.2	Struktur und Eigenschaften keramischer Stoffe	342
8.2.1	Thermoschockbeständigkeit	343
8.3	Bearbeitung der Werkstoffe	346
8.4	Werkstoffsorten	347
8.4.1	Oxidische Werkstoffe	347
8.4.2	Nichtoxidische Werkstoffe	351
8.5	Neue Verfahren zur Herstellung der Pulver-Ausgangsstoffe	356
8.6	Mineralglas	357
8.7	Vergleich einiger anorganisch-nichtmetallischer Werkstoffe	361
9	Kunststoffe (Polymere)	363
9.1	Allgemeines	364
9.2	Eigenschaften	366
9.2.1	Vergleich mit Metallen	366
9.2.2	Mechanisches Verhalten	367
9.2.3	Temperaturverhalten	372
9.2.3.1	Glastemperatur, Schmelztemperatur und Zersetzungstemperatur	373
9.2.4	Verarbeitungseigenschaften	375
9.2.5	Bauteileigenschaften	377
9.3	Gebräuchliche Kunststoffe	378
9.3.1	Wichtige Thermoplaste	381
9.3.1.1	PE, Polyethylen	382
9.3.1.2	PP, Polypropylen	383
9.3.1.3	PVC, Polyvinylchlorid	384
9.3.1.4	PS, Polystyrol	384
9.3.1.5	ABS, Acrylnitril-Butadien-Styrol	385
9.3.1.6	PA, Polyamid	385
9.3.1.7	POM, Polyoximethylen	386

	9.3.1.8	PET, Polyethylenterephthalat	386
	9.3.1.9	PC, Polycarbonat	386
9.3.2		Duomere und Elastomere	387
	9.3.2.1	Allgemeines	387
	9.3.2.2	Formmassetypen	388
9.3.3		Elastomere	389
9.3.4		Thermoplastische Elastomere (TPE)	393
10		Verbundstrukturen und Verbundwerkstoffe	395
10.1		Begriffsklärung	395
	10.1.1	Verbundwerkstoffe	395
	10.1.2	Werkstoffverbunde	397
	10.1.3	Verbundkonstruktionen	398
	10.1.4	Struktur und Einteilung der Verbundwerkstoffe	399
10.2		Schichtverbundwerkstoffe	401
10.3		Faserverbundwerkstoffe (FVW)	402
	10.3.1	Faserwerkstoffe und Eigenschaften	402
	10.3.2	Faserverstärkte Polymere	404
10.4		Teilchenverbundwerkstoffe	405
10.5		Durchdringungsverbundwerkstoffe	407
10.6		Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe (MMC)	407
	10.6.1	Allgemeines	407
	10.6.2	Metallmatrix-Faserverbunde	408
	10.6.3	Metallmatrix-Teilchenverbunde	409
	10.6.4	Metallmatrix-Durchdringungsverbunde	410
	10.6.5	Metallschäume	412
10.7		Keramik-Matrix-Verbunde (CMC)	413
	10.7.1	Allgemeines	413
	10.7.2	Faserverbundkeramik	414
	10.7.3	Durchdringungsverbundkeramik	415
11		Werkstoffe besonderer Herstellung oder Eigenschaften	417
11.1		Pulvermetallurgie, Sintermetalle	417
	11.1.1	Überblick und Einordnung	417
	11.1.2	Pulverherstellung	420
	11.1.3	Formgebung und Verdichten	421
	11.1.4	Sintern	423
	11.1.5	Nachbehandlung der Sinterteile	425
	11.1.6	Werkstoffe	426
		11.1.6.1 Werkstoffe, schmelzmetallurgisch nicht herstellbar (sog. Pseudolegierungen)	427
		11.1.6.2 Pulvermischungen für Formteile	428

11.1.7	Legierungstechniken	429
11.1.8	Klassifizierung, Normung	431
11.1.9	Sprühkompaktieren (Spray Forming)	432
11.2	Schichtwerkstoffe und Schichtherstellung	434
11.2.1	Begriffe, Abgrenzung	434
11.2.2	Thermisches Spritzen	435
11.2.3	Auftragschweißen und -löten	440
11.2.4	Abscheiden aus der Gasphase	441
11.2.4.1	CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition)	444
11.2.4.2	PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition)	445
11.2.5	Beschichten aus dem ionisierten Zustand	447
11.3	Lager- und Gleitwerkstoffe	447
11.3.1	Allgemeines	447
11.3.2	Lagermetalle	451
11.3.3	Weitere Lagerwerkstoffe, selbstschmierende Lager	451
11.4	Werkstoffe mit steuerbaren Eigenschaftsänderungen	452
11.4.1	Begriffe	452
11.4.2	Piezokeramik	453
11.4.3	Formgedächtnis-Legierungen	454
12	Korrosionsbeanspruchung und Korrosionsschutz	459
12.1	Einführung	459
12.1.1	Chemische Reaktion	460
12.1.2	Metallphysikalische Reaktion	460
12.1.3	Elektrochemische Reaktion	461
12.2	Grundlagen der elektrochemischen Korrosion	461
12.2.1	Die Entstehung von Ionen	461
12.2.2	Ursache der Ionenleitfähigkeit von H ₂ O	462
12.2.3	Lösungsdruck	463
12.2.4	Galvanische Spannungsreihe	463
12.2.5	Galvanisches Element	464
12.2.6	Korrosionselemente	465
12.3	Korrosionsarten	468
12.3.1	Korrosionsprodukte	468
12.3.2	Korrosionsarten und -erscheinungen	469
12.4	Korrosionsarten mit zusätzlichen Beanspruchungen	471
12.4.1	Korrosion und Festigkeitsbeanspruchung	471
12.4.2	Korrosion unter tribologischer Beanspruchung	473
12.4.3	Korrosion und thermische Beanspruchung	474
12.5	Korrosionsschutz	475
12.5.1	Trennung von Metall und Korrosionsmittel durch Schutzschichten	476

12.5.2	Korrosionsschutz durch Werkstoffwahl oder Eigenschaftsänderung	476
12.5.3	Änderung der Reaktionsbedingungen	480
13	Überlegungen zur Werkstoffauswahl	483
13.1	Auswahlprinzip für Werkstoffe	483
13.1.1	Anforderungs- und Eigenschaftsprofil	483
13.1.2	Maßnahmen zur Verbesserung nicht ausreichender Eigenschaftsprofile	485
13.2	Werkstoffwahl, eine komplexe Optimierungsaufgabe	486
13.2.1	Allgemeines	486
13.2.2	Vereinfachte Direktwahl	488
13.2.3	Allgemeine, indirekte Wahl	489
13.2.4	Einfluss des Fertigungsweges auf die Werkstoffwahl	490
13.2.5	Integral- oder Differenzialbauweise?	491
13.2.6	Einfluss der Bauteilmerkmale auf den Fertigungsweg	492
13.2.7	Vergleich einiger Fertigungsverfahren	494
14	Werkstoffprüfung	497
14.1	Aufgaben, Abgrenzung	497
14.2	Prüfung von Werkstoffkennwerten	498
14.3	Mechanische Eigenschaften bei statischer Belastung	499
14.3.1	Zugversuch für Metalle, DIN EN ISO 6892-1/09	503
14.3.2	Zugversuch für Kunststoffe, EN ISO 527-1	506
14.3.3	Wärmeformbeständigkeit DIN EN ISO 75-1,-2,-3	509
14.3.4	Allgemeines Bruchverhalten	510
14.3.5	Zeitfestigkeiten	514
14.4	Dynamische Belastung	515
14.4.1	Bauteilversagen bei dynamischer Belastung	516
14.4.2	Spannungszustände	517
14.4.3	Kerbschlagbiegeversuch (DIN EN ISO 148/11)	518
14.4.4	Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve	519
14.5	Zyklische Belastung	522
14.5.1	Allgemeines Verhalten	522
14.5.2	Belastungsformen bei zyklischer Belastung	524
14.5.3	Dauerschwingversuche (DIN 50 100/78)	526
14.5.4	Dauerschwingfestigkeiten	528
14.5.5	Dauerfestigkeitsschaubild für Zug-Druck-Beanspruchung nach Smith	529
14.5.6	Dauerfestigkeit und Einflussgrößen	530
14.5.7	Wöhlerversuche mit Kunststoffen	530

14.6	Messung der Härte	531
14.6.1	Härteprüfung nach Brinell	532
14.6.2	Härteprüfung nach Vickers	535
14.6.3	Härteprüfung nach Rockwell	537
14.6.4	Vergleich der Härtewerte nach Brinell, Vickers und Rockwell	538
14.6.5	Schlaghärteprüfung (Poldi-Hammer)	539
14.6.6	Härteprüfung nach Shore	540
14.7	Thermische Verfahren	541
14.7.1	TGA (Thermo-Gravimetrie-Analyse) DIN EN ISO 11358	541
14.7.2	DSC (differential scanning calorimetry)	542
14.7.3	DMA (Dynamisch mechanische Analyse)	546
14.8	Prüfung von Verarbeitungseigenschaften (technologische Versuche)	548
14.8.1	Biegeversuch (DIN EN ISO 7438/05)	548
14.8.2	Tiefungsversuch nach Erichsen (DIN EN ISO 20482/03)	548
14.8.3	Stirnabschreckversuch nach Jominy (DIN EN ISO 642/00)	549
14.9	Untersuchung des Gefüges	550
14.9.1	Mikroskopische Untersuchungen	550
14.9.2	Quantitative Gefügeanalyse	551
14.9.3	Makroskopische Untersuchungen	552
14.10	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Qualitätskontrolle	553
14.10.1	Eindringverfahren (Penetrierverfahren, DIN EN 571/97)	555
14.10.2	Magnetische Prüfungen (DIN EN ISO 9934/02)	555
14.10.3	Wirbelstromprüfung (DIN EN ISO 15549/10)	556
14.10.4	Ultraschallprüfung (DIN EN 583, Teil 1–6/97–08)	557
14.10.5	Röntgen-/Gammastrahlen-Prüfung (DIN EN 444/94)	559
14.10.6	Computertomographie	561
14.11	Überprüfung der chemischen Zusammensetzung	561
14.11.1	Funkenspektrometrie	562
14.11.2	Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX) im Rasterelektronenmikroskop	562
Anhang A: Die systematische Bezeichnung der Werkstoffe		565
A.1	Kennzeichnung der Stähle	565
A.1.1	Bezeichnungssystem für Stähle	565
A.1.2	Aufbau des Kurznamens (DIN EN 10027-1/05)	566
A.1.3	Stähle für den Stahlbau	567
A.1.4	Stähle für Druckbehälter	567
A.1.5	Stähle für den Maschinenbau	567
A.1.6	Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus höherfesten Stählen zum Kaltumformen	568
A.1.7	Flacherzeugnisse (kaltgewalzt) aus weichen Stählen zum Kaltumformen	568

A.1.8	Nach der chemischen Zusammensetzung bezeichnete Stähle .	568
A.1.8.1	Unlegierte Stähle mit mittlerem Mn-Gehalt < 1 % .	568
A.1.8.2	Niedriglegierte Stähle (mittlerer Gehalt der LE < 5 %) ohne Zeichen, auch unlegierte Stähle mit > 1 % Mn, und Automatenstähle	569
A.1.8.3	Nichtrostende Stähle und andere legierte Stähle (ausgenommen Schnellarbeitsstähle), sofern der mittlere Gehalt mindestens eines Legierungs- elementes $\geq 5\%$ ist	569
A.1.8.4	Schnellarbeitsstähle	569
A.1.9	Nummernsystem (DIN EN 10027-2/92)	570
A.2	Bezeichnung der Eisen-Guss-Werkstoffe	573
A.3	Bezeichnung der NE-Metalle	574
A.3.1	Allgemeines	574
A.3.2	Bezeichnung von Aluminium und -legierungen	574
A.3.3	Bezeichnung von Kupfer und -legierungen	576
A.4	Bezeichnung der Kunststoffe	577
Glossar		583
Sachverzeichnis		589