

Jürgen Ruge  
Helmut Wohlfahrt

# **Technologie der Werkstoffe**

**Für Studenten des Maschinenbaus  
und Bauingenieurwesens,  
der Verfahrenstechnik und der Werkstoffkunde**

7., durchgesehene und erweiterte Auflage

Mit 280 Abbildungen und 66 Tabellen

Studium Technik



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Der Begriff Werkstofftechnologie</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau der Werkstoffe [62 - 69]</b> .....	<b>2</b>
2.1	Submikroskopische Betrachtung – kristalline und nichtkristalline Strukturen .....	2
2.1.1	Kristallisationsformen metallischer Werkstoffe .....	2
2.1.1	Bindekräfte .....	6
2.1.3	Platzwechsel, Gitterstörungen, Diffusion .....	7
2.2	Mikroskopische Betrachtung – Entstehung von Kristallen und Kristallgefügen .....	8
<b>3</b>	<b>Eigenschaften der Werkstoffe</b> .....	<b>11</b>
3.1	Ermittlung von Werkstoffeigenschaften (Werkstoffkennwerten) als Aufgabe der Werkstoffprüfung .....	11
3.2	Prüfverfahren mit Zerstörung des Werkstückes.....	12
3.2.1	Prüfung der physikalischen Eigenschaften .....	12
3.2.2	Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften.....	12
3.2.2.1	Der Zugversuch (DIN EN 10 002).....	12
3.2.2.2	Der Druckversuch (DIN 50 106) .....	22
3.2.2.3	Der technologische Biegeversuch (DIN EN 910).....	22
3.2.2.4	Die Härteprüfung.....	24
3.2.2.5	Der Kerbschlagbiegeversuch (DIN EN 10 045).....	27
3.2.2.6	Der Dauerschwingversuch (DIN 50 100, DIN 50 113, DIN 50 142) .....	30
3.2.2.7	Der Betriebsfestigkeitsversuch .....	40
3.2.2.8	Der Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung (DIN 50 118).....	42
3.3	Prüfverfahren ohne Zerstörung des Werkstückes [70] .....	45
3.3.1	Prüfverfahren zur Ermittlung von Werkstoffeigenschaften.....	45
3.3.2	Prüfverfahren zur Ermittlung der Werkstoffbeschaffenheit .....	45
3.3.3	Prüfverfahren zur Fehlerdetektion.....	45
<b>4</b>	<b>Veränderung von Aufbau und Eigenschaften metallischer Werkstoffe</b> .....	<b>47</b>
4.1	Legieren und Legierungen .....	47
4.1.1	Struktur der Legierungen.....	47
4.1.1.1	Mischkristalle .....	47
4.1.1.2	Intermetallische Verbindungen .....	48
4.1.1.3	Intermediäre Verbindungen.....	48

4.1.1.4	Phasen und Gefüge .....	48
4.1.2	Zustandsschaubilder für Zweistofflegierungen (Binäre Systeme) .....	49
4.1.2.1	Allgemeines über Zustandsschaubilder .....	49
4.1.2.2	Gehalt und Konzentration .....	49
4.1.2.3	Die Gibbs'sche Phasenregel .....	51
4.1.2.4	Grundtypen von binären Zustandsschaubildern .....	52
4.1.2.5	Zusammengesetzte binäre Systeme .....	63
4.1.3	Zustandsschaubilder für Dreistofflegierungen (Ternäre Systeme) .....	63
4.1.4	Die Eisen-Kohlenstoff-Schaubilder .....	67
4.1.4.1	Unterscheidung von Stahl und Gußeisen. Metastabiles und stables Eisen-Kohlenstoff-Schaubild .....	67
4.1.4.2	Das metastabile Eisen-Kohlenstoff-Schaubild .....	67
4.1.4.3	Erstarrungs- und Umwandlungsvorgänge bei Stahl .....	69
4.1.4.4	Erstarrungs- und Umwandlungsvorgänge bei weißem Gußeisen ....	70
4.1.4.5	Erstarrungs- und Umwandlungsvorgänge bei grauem Gußeisen ....	72
4.2	Wärmebehandlung von Stahl .....	73
4.2.1	Ausgangsgefüge vor der Wärmebehandlung .....	74
4.2.2	Wärmebehandlungsverfahren (DIN EN 10 052) .....	75
4.2.2.1	Durchgreifende Wärmebehandlungsverfahren .....	75
4.2.2.2	Randschichtbehandlungen (thermochemisch oder thermisch) .....	82
4.3	Thermomechanische Behandlungen .....	86
4.4	Kaltverformen .....	87
4.5	Versprödungserscheinungen bei Erwärmung und / oder Verformung (Alterung) ....	87
<b>5</b>	<b>Metallische Konstruktionswerkstoffe, Kennzeichnung, spezifische Eigenschaften, typische Anwendungen .....</b>	<b>89</b>
5.1	Kennzeichnung metallischer Werkstoffe .....	89
5.1.1	Kennzeichnung der Stähle durch symbolische Buchstaben und Zahlen nach EU 27-74, DIN V 17 006 Teil 100 und DIN EN 10 027 .....	89
5.1.1.1	Kennzeichnung nach der chemischen Zusammensetzung .....	89
5.1.1.2	Kennzeichnung der Stähle nach den mechanischen Eigenschaften und dem Verwendungszweck .....	90
5.1.2	Kennzeichnung der Gußeisensorten (DIN EN 1560) .....	92
5.1.3	Kennzeichnung der NE-Metalle .....	94
5.1.4	Werkstoffkennzeichnung durch Werkstoffnummern nach DIN 17 007 und DIN EN 10 027 .....	94
5.1.5	Luftfahrtnormen .....	95
5.2	Im Maschinenbau übliche Stähle [26, 27] .....	95
5.2.1	Einteilung der im Maschinenbau üblichen Stähle .....	95
5.2.2	Unlegierte Stähle .....	100
5.2.2.1	Feinbleche aus weichen, unlegierten Stählen (DIN EN 10 027, DIN EN 10 130) .....	101
5.2.2.2	Warmgewalzte unlegierte Baustähle (DIN EN 10 025) .....	103

5.2.2.3	Stähle für nahtlose Rohre (DIN 1629, DIN 1630, DIN EN 10 027-1).....	103
5.2.2.4	Stähle für den Druckbehälterbau (DIN EN 10 028-1) .....	104
5.2.2.5	Schweißgeeignete, normalgeglühte Feinkornbaustähle (DIN EN 10 028-3 und DIN EN 10 113-1 bis -3).....	104
5.2.2.6	Schweißgeeignete, wasservergütete Feinkornbaustähle .....	105
5.2.2.7	Unlegierte Einsatzstähle (DIN 17 210, DIN EN 10 084).....	105
5.2.2.8	Unlegierte Vergütungsstähle (DIN EN 10 083-1 und -2) .....	106
5.2.3	Legierte Stähle.....	106
5.2.3.1	Niedriglegierte Kesselstähle (DIN 17 175) .....	106
5.2.3.2	Niedriglegierte Vergütungsstähle (DIN EN 10 083-1 und -2) .....	107
5.2.3.3	Niedriglegierte Einsatzstähle (DIN 17 210, DIN EN 10 084).....	108
5.2.3.4	Rost- und zunderbeständige ferritische Chromstähle (DIN EN 10 088-1 bis -3).....	110
5.2.3.5	Rost- und säurebeständige austenitische Stähle (DIN EN 10 088-1 bis -3).....	111
5.2.3.6	Stähle mit „einstellbarer“ Wärmeausdehnung.....	111
5.2.3.7	Kaltarbeitsstähle (DIN EN ISO 4957) .....	112
5.2.3.8	Schnellarbeitsstähle (DIN EN ISO 4957) .....	112
5.2.3.9	Warmarbeitsstähle (DIN EN ISO 4957) .....	112
5.3	Stahlguß (DIN 1681) .....	113
5.4	Im Maschinenbau übliche Gußeisensorten .....	113
5.4.1	Möglichkeiten der Gefügeausbildung .....	113
5.4.2	Gußeisen mit Lamellengraphit (GG nach DIN 1691 oder EN-GJL nach DIN EN 1561).....	114
5.4.3	Gußeisen mit Kugelgraphit (GGG nach DIN 1693 oder EN-GJS nach DIN EN 1563).....	117
5.4.4	Gußeisen mit Vermiculargraphit (GGV oder EN-GJV nach DIN EN 1560).....	118
5.4.5	Temperguß (GT nach DIN 1692 oder EN-GJM nach DIN EN 1562).....	119
5.4.5.1	Weißer Temperguß (GTW oder EN-GJMW).....	119
5.4.5.2	Schwarzer Temperguß (GTS oder EN-GJMB) .....	120
5.4.6	Hochlegiertes Gußeisen (DIN 1694).....	121
5.5	Im Maschinenbau übliche Nichteisenmetalle .....	121

5.5.1	Leichtmetalle .....	122
5.5.1.1	Aluminium und Aluminiumlegierungen (DIN EN 515, DIN EN 573, DIN prEN 12 258-1, [28]) .....	122
5.5.1.2	Magnesium und Magnesiumlegierungen (DIN 1729, DIN EN 1753, DIN EN 1754, [51]) .....	127
5.5.1.3	Titan und Titanlegierungen (DIN 17 850, DIN 17 851, [52]).....	128
5.5.2	Schwermetalle .....	129
5.5.2.1	Kupfer und Kupferlegierungen (DIN EN 1173, DIN EN 1412, [53]) .....	130
5.5.2.2	Nickel und Nickellegierungen (DIN 17 740 E, [54]) .....	131
5.5.2.3	Zink (DIN EN 988, DIN EN 1179, DIN EN 1774, DIN EN 12 441, DIN EN 12 844, DIN EN 13 283, DIN EN 14 290).....	132
5.5.3	Hartmetalle .....	133
<b>6</b>	<b>Nichtmetallische Werkstoffe .....</b>	<b>134</b>
6.1	Reine und abgewandelte Naturstoffe .....	134
6.1.1	Keramische Werkstoffe [74, 75, 76].....	134
6.2	Polymerwerkstoffe (Kunststoffe) [77].....	135
6.2.1	Herstellung der Polymerwerkstoffe.....	136
6.2.1.1	Polymerisation .....	136
6.2.1.2	Polykondensation .....	138
6.2.1.3	Polyaddition.....	138
6.2.2	Der innere Aufbau der Polymerwerkstoffe.....	139
6.2.3	Eigenschaften der Polymerwerkstoffe.....	143
6.2.3.1	Mechanische Eigenschaften .....	143
6.2.3.2	Elektrische Eigenschaften .....	146
6.2.4	Die wichtigsten Polymerwerkstoffe und ihre Anwendung .....	147
6.2.4.1	Polymerisate .....	149
6.2.4.2	Polykondensate.....	158
6.2.4.3	Polyaddukte.....	164
6.2.5	Weichmacher, Gleitmittel, Füllstoffe, Antistatika .....	166
6.2.6	Schaumstoffe .....	166
6.2.7	Faserverstärkte Kunststoffe .....	167
6.2.8	Metallisieren von Polymerwerkstoffen.....	169
<b>7</b>	<b>Herstellung von Eisen und Stahl [55, 71] .....</b>	<b>171</b>
7.1	Erzeugung von Roheisen .....	171
7.1.1	Eisenerz .....	171
7.1.2	Koks.....	173
7.1.3	Zuschläge.....	174
7.1.4	Hochofen .....	175
7.1.5	Erzeugnisse des Hochofens .....	180
7.1.6	Entwicklungstendenzen im Hochofenbau .....	183
7.1.7	Andere Verfahren zur Erzreduktion und Herstellung von Roheisen .....	184

7.2	Stahlherstellung .....	185
7.2.1	Chemische Vorgänge beim Frischen .....	185
7.2.2	Frischverfahren.....	186
7.3	Sekundärmetallurgie .....	191
7.3.1	Pfannenmetallurgie ohne Vakuum .....	192
7.3.2	Vakuummetallurgie .....	192
7.3.3	Sonderverfahren zur Herstellung hochlegierter Stähle.....	193
7.3.4	Umschmelzverfahren.....	194
7.4	Energierückgewinnung und Umweltschutz .....	195
7.5	Vergießen von Stahl .....	196
<b>8</b>	<b>Verarbeitung metallischer Werkstoffe [56, 78] .....</b>	<b>201</b>
8.1	Warmformgebung.....	202
8.1.1	Werkstoffverhalten beim Umformen [58].....	202
8.1.2	Verfahren zur Warmformgebung .....	205
8.1.2.1	Schmieden .....	205
8.1.2.2	Warmwalzen.....	212
8.1.2.3	Herstellung von nahtlosen Rohren .....	218
8.1.2.4	Herstellung von geschweißten Rohren .....	221
8.1.2.5	Strangpressen .....	222
8.2	Kaltformgebung.....	223
8.2.1	Merkmale der Kaltformgebung .....	223
8.2.2	Verfahren der Kaltformgebung .....	224
8.2.2.1	Kaltwalzen.....	224
8.2.2.2	Biegeumformen .....	224
8.2.2.3	Tiefziehen .....	227
8.2.2.4	Streckziehen .....	229
8.2.2.5	Drücken .....	229
8.2.2.6	Innenhochdruckumformen (Hydroforming).....	229
8.2.2.7	Draht-, Stangen- und Rohrziehen .....	230
8.2.2.8	Fließpressen.....	233
8.2.2.9	Hochgeschwindigkeitsumformen (Hochenergieumformen).....	233
8.3	Gießereitechnik [60] .....	234
8.3.1	Gußwerkstoffe und Besonderheiten beim Gießen .....	235
8.3.2	Gießereiöfen .....	237
8.3.3	Gießverfahren mit verlorenen Formen .....	239
8.3.4	Gießverfahren mit Dauerformen .....	244
8.3.4.1	Kokillenguß.....	244
8.3.4.2	Druckguß.....	245
8.3.4.3	Thixogießen.....	246
8.3.4.4	Niederdruckgießverfahren.....	247
8.3.4.5	Schleuderguß .....	247
8.3.4.6	Schleuderformguß .....	248
8.3.4.7	Strangguß .....	248
8.3.4.8	Bandgießen.....	248
8.3.4.9	Gießwalzen.....	249

8.3.4.10	Verbundguß .....	249
8.3.5	Nachbehandlung .....	250
8.3.6	Regeln für den Konstrukteur und Gießerei-Ingenieur .....	250
8.3.6.1	Stoffgerechter Entwurf .....	250
8.3.6.2	Gießgerechter Entwurf .....	252
8.3.6.3	Formgerechter Entwurf .....	256
8.4	Pulvermetallurgie [79] .....	257
8.5	Herstellung von Überzügen auf Stahl [61, 72].....	259
8.5.1	Metallische Überzüge .....	259
8.5.1.1	Plattieren.....	259
8.5.1.2	Metallspritzen .....	260
8.5.1.3	CVD- und PVD-Beschichtung .....	261
8.5.2	Nichtmetallische Überzüge.....	261
8.6	Schweißen, Löten und Kleben von Metallen [42] .....	262
8.6.1	Schweißen von Metallen .....	262
8.6.1.1	Schmelzschweißverfahren .....	266
8.6.1.2	Preßschweißverfahren .....	267
8.6.2	Löten von Metallen.....	268
8.6.3	Kleben von Metallen .....	268
<b>9</b>	<b>Verarbeitung der Polymerwerkstoffe.....</b>	<b>269</b>
9.1	Umformen.....	269
9.1.1	Umformverfahren für Thermoplaste.....	269
9.1.2	Urformverfahren für Thermoplaste .....	271
9.1.3	Umformverfahren für Duroplaste .....	273
9.2	Spanen .....	273
9.3	Schweißen und Kleben von Polymerwerkstoffen .....	274
9.3.1	Schweißen von Polymerwerkstoffen .....	274
9.3.2	Kleben von Polymerwerkstoffen .....	274
	<b>Quellennachweis .....</b>	<b>276</b>
	<b>Weiterführende Literatur .....</b>	<b>278</b>
	<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>280</b>