

Prof. Dr.-Ing. Olaf Jacobs

Werkstoffkunde

Vogel Buchverlag

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung und Grundbegriffe	13
1.1 Lernziele	13
1.2 Bedeutung der Werkstoffkunde	13
1.2.1 Werkstoffe und Produktfunktionalität	13
1.2.2 Werkstoffe und Produktqualität	14
1.2.3 Werkstoffe und Produktlebensdauer	14
1.2.4 Werkstoffe und Kosten	15
1.2.4.1 Werkstoffe und Herstellkosten	15
1.2.4.2 Werkstoffe und Betriebskosten	15
1.2.4.3 Werkstoffe und Entsorgungskosten	16
1.2.5 Werkstoff, Fertigung und Konstruktion	17
1.2.5.1 Werkstoff und Fertigung	17
1.2.5.2 Fertigung und Konstruktion	17
1.2.5.3 Werkstoff und Konstruktion	18
1.2.5.4 Simultaneous Engineering	18
1.3 Grundbegriffe	19
1.3.1 Leitfragen	19
1.3.2 Elastische Verformung	19
1.3.3 Plastische Verformung	20
1.3.4 Zähigkeit und Sprödigkeit	20
1.4 Aufgaben zur Selbstüberprüfung	21
1.4.1 Aufgaben	21
1.4.2 Musterlösungen	22
2 Aufbau von Werkstoffen	25
2.1 Lernziele	25
2.2 Atombau und Periodensystem	25
2.2.1 Leitfragen	25
2.2.2 Atombau	26
2.2.2.1 Chemische Elemente	26
2.2.2.2 Die Elektronenhülle	27
2.2.3 Periodensystem der Elemente	29
2.3 Bindungen	30
2.3.1 Leitfragen	30
2.3.2 Übersicht über die Bindungsarten	30
2.3.3 Ionenbindung	31
2.3.4 Kovalente Bindung	32
2.3.5 Metallische Bindung	33
2.3.6 Sekundäre Bindungen	34
2.3.7 Bindungspotential und Bindungskräfte	35
2.4 Gitterstrukturen	37
2.4.1 Leitfragen	38
2.4.2 Überblick über Gitterstrukturen	38
2.4.3 Das krz-Gitter	40
2.4.4 Das hdp-Gitter	41
2.4.5 Das kfz-Gitter	42
2.4.6 Gleitsysteme	43
2.4.7 Kristallgitter und Werkstoffeigenschaften	44

2.4.7.1	Isotropie und Anisotropie	44
2.4.7.2	Umformbarkeit	45
2.4.7.3	Allotropie	46
2.5	Gitterbaufehler	46
2.5.1	Leitfragen	46
2.5.2	Übersicht über Gitterbaufehler	47
2.5.3	Punktdefekte	48
2.5.4	Versetzungen	49
2.5.5	Korngrenzen	51
2.5.6	Volumendefekte	51
2.5.7	Gitterbaufehler und Werkstoffeigenschaften	51
2.6	Entstehung von Gefügestrukturen	52
2.6.1	Leitfragen	53
2.6.2	Der Kristallisationsvorgang	54
2.6.3	Diffusion	55
2.6.4	Phasendiagramme	57
2.6.4.1	Unlöslichkeit im festen Zustand	59
2.6.4.2	Vollständige Löslichkeit im festen Zustand	60
2.6.4.3	Eutektische Systeme	62
2.6.4.4	Ausscheidungshärtung	66
2.6.4.5	Weitere Phasendiagramme	67
2.6.4.6	Das Hebelgesetz	68
2.7	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	69
2.7.1	Aufgaben	69
2.7.2	Musterlösungen	72
3	Mechanische Werkstoffeigenschaften	79
3.1	Lernziele	79
3.2	Dehnung und Spannung	79
3.3	Belastungsarten	82
3.3.1	Leitfragen	82
3.3.2	Einführung	82
3.3.3	Zugbelastung	83
3.3.4	Druckbelastung	83
3.3.5	Schub- oder Scherbelastung	84
3.3.6	Zusammenhang Zug, Druck und Schub	84
3.4	Mechanische Werkstoffkennwerte	88
3.4.1	Der Zugversuch	88
3.4.1.1	Leitfragen	88
3.4.1.2	Versuchsdurchführung und -auswertung	88
3.4.2	Druck und Schubkennwerte	94
3.4.3	Risszähigkeit	95
3.4.3.1	Leitfragen	96
3.4.3.2	Risszähigkeit	96
3.4.4	Werkstoffermüdung	99
3.4.4.1	Leitfragen	99
3.4.4.2	Wöhlerkurven	99
3.4.4.3	Mechanismen der Materialermüdung	102
3.4.4.4	Rissfortschrittskurven	104
3.4.5	Härteprüfung	105
3.4.5.1	Leitfragen	106
3.4.5.2	Härteprüfung nach VICKERS	106
3.4.5.3	Härteprüfung nach BRINELL	107
3.4.5.4	Härteprüfung nach ROCKWELL	107
3.4.5.5	Allgemeine Betrachtungen zur Härte	108

3.4.6	Kerbschlagbiegeversuch	
3.4.6.1	Leitfragen	
3.4.6.2	Versuchsdurchführung	
3.4.7	Temperatureinflüsse	
3.4.7.1	Leitfragen	
3.4.7.2	Spezifische Wärme	
3.4.7.3	Spezifische Wärmekapazität	
3.4.7.4	Wärmeausdehnungskoeffizient	
3.4.7.5	Festigkeit	
3.4.7.6	Kriechen	
3.4.8	Korrosion	
3.4.8.1	Leitfragen	
3.4.8.2	Chemische Korrosion	
3.4.8.3	Elektrochemische Korrosion	
3.4.8.4	Korrosionsgeschwindigkeit	
3.4.9	Reibung und Verschleiß	
3.4.9.1	Leitfragen	
3.4.9.2	Reibungs- und Verschleißkoeffizient	
3.4.9.3	Reibung und Verschleiß	
3.5	Bedeutung der Werkstoffkennwerte	
3.5.1	Leitfragen	
3.5.2	Kennwert Fließgrenze	
3.5.3	Kennwert Festigkeit	
3.5.4	Kennwert E-Modul	
3.5.5	Kennwert Bruchdehnung	
3.5.6	Kennwert Risszähigkeit	
3.5.7	Kennwert Dauer-/Zeitbruch	
3.5.8	Kennwert Härte	
3.6	Ausblick: Weitere Werkstoffkennwerte	
3.7	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	
3.7.1	Aufgaben	
3.7.2	Musterlösungen	
4	Eisenwerkstoffe	
4.1	Lernziele	
4.2	Herstellung und Struktur von Eisen	
4.2.1	Leitfragen	
4.2.2	Herstellung von Stahl	
4.2.3	Gitterstrukturen von Eisen	
4.2.4	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	
4.2.4.1	Abkühlungs- und Aufheizkurven	
4.2.4.2	Abkühlung	
4.2.4.3	Abkühlung	
4.2.4.4	Abkühlung	
4.3	Wärmebehandlungsverfahren	
4.3.1	Leitfragen	
4.3.2	Glühverfahren für Stahl	
4.3.2.1	Normalglüh	
4.3.2.2	Weichglüh	
4.3.2.3	Grobkornglüh	
4.3.2.4	Rekristallisationsglüh	
4.3.2.5	Diffusionsglüh	
4.3.2.6	Spannungsglüh	
4.3.3	Härten und Vergüten	
4.3.3.1	Martensit	

3.4.6	Kerbschlagbiegeversuch.....	109
3.4.6.1	Leitfragen.....	109
3.4.6.2	Versuchsdurchführung und -auswertung.....	109
3.4.7	Temperatureinflüsse.....	111
3.4.7.1	Leitfragen.....	111
3.4.7.2	Spezifische Wärmekapazität.....	112
3.4.7.3	Spezifische Wärmeleitfähigkeit.....	113
3.4.7.4	Wärmeausdehnung.....	114
3.4.7.5	Festigkeit und Temperatur.....	116
3.4.7.6	Kriechen.....	117
3.4.8	Korrosion.....	118
3.4.8.1	Leitfragen.....	118
3.4.8.2	Chemische Korrosion.....	118
3.4.8.3	Elektrochemische Korrosion.....	119
3.4.8.4	Korrosionsarten.....	121
3.4.9	Reibung und Verschleiß.....	122
3.4.9.1	Leitfragen.....	122
3.4.9.2	Reibungs- und Verschleißkennwerte.....	123
3.4.9.3	Reibung und Verschleiß als Systemeigenschaften.....	124
3.5	Bedeutung der Werkstoffkennwerte.....	126
3.5.1	Leitfragen.....	126
3.5.2	Kennwert Fließgrenze.....	127
3.5.3	Kennwert Festigkeit.....	127
3.5.4	Kennwert E-Modul.....	127
3.5.5	Kennwert Bruchdehnung.....	128
3.5.6	Kennwert Risszähigkeit.....	128
3.5.7	Kennwert Dauer-/Zeitfestigkeit.....	128
3.5.8	Kennwert Härte.....	129
3.6	Ausblick: Weitere Werkstoffkennwerte und Prüfverfahren.....	129
3.7	Aufgaben zur Selbstüberprüfung.....	129
3.7.1	Aufgaben.....	129
3.7.2	Musterlösungen.....	134
4	Eisenwerkstoffe.....	141
4.1	Lernziele.....	141
4.2	Herstellung und Struktur von Eisenwerkstoffen.....	141
4.2.1	Leitfragen.....	141
4.2.2	Herstellung von Stahl und Gusseisen.....	142
4.2.3	Gitterstrukturen von Eisen.....	143
4.2.4	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD).....	144
4.2.4.1	Abkühlung eines untereutektoiden Stahls ($C < 0,02\%$).....	146
4.2.4.2	Abkühlung eines eutektoiden Stahls ($C = 0,8\%$).....	147
4.2.4.3	Abkühlung eines untereutektoiden Stahls mit $C > 0,02\%$	148
4.2.4.4	Abkühlung eines übereutektoiden Stahls ($C = 1,2\%$).....	149
4.3	Wärmebehandlungsverfahren für Stähle.....	150
4.3.1	Leitfragen.....	150
4.3.2	Glühverfahren für Stähle.....	150
4.3.2.1	Normalglühen oder Normalisieren.....	152
4.3.2.2	Weichglühen.....	152
4.3.2.3	Grobkornglügen.....	152
4.3.2.4	Rekristallisationsglühen.....	153
4.3.2.5	Diffusionsglühen (Homogenisieren).....	153
4.3.2.6	Spannungsarmglühen.....	153
4.3.3	Härten und Vergüten von Stahl.....	154
4.3.3.1	Martensitische Härtung.....	154

4.3.3.2	Vergüten	156
4.3.3.3	Randschichthärtung	157
4.3.3.4	Einsatzhärtung	158
4.3.3.5	Nitrieren	158
4.4	Gebräuchliche Eisenwerkstoffe	159
4.4.1	Leitfragen	159
4.4.2	Stahlarten	159
4.4.2.1	Legierungselemente	159
4.4.2.2	Einteilung der Stähle nach DIN EN 10 020	161
4.4.2.3	Einteilung nach Einsatzgebiet	161
4.4.3	Gusseisentypen	164
4.4.4	Bezeichnung von Eisenwerkstoffen	165
4.4.4.1	Stahlkurznamen (EN 10 027-1)	166
4.4.4.2	Kurznamen für Gusswerkstoffe (DIN EN 1560)	167
4.4.4.3	Werkstoffnummern (DIN EN 10 027-2)	168
4.5	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	168
4.5.1	Aufgaben	168
4.5.2	Musterlösungen	171
5	Nichteisenmetalle	175
5.1	Lernziele	175
5.2	Übersicht	175
5.3	Leichtmetalle	175
5.3.1	Leitfragen	175
5.3.2	Aluminium	176
5.3.2.1	Reinaluminium	177
5.3.2.2	Naturharte Aluminiumlegierungen	178
5.3.2.3	Ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierungen	178
5.3.2.4	Al-Gusslegierungen	180
5.3.2.5	Eloxieren	181
5.3.3	Magnesium	182
5.3.3.1	Reinmagnesium	182
5.3.3.2	Magnesiumlegierungen	182
5.3.4	Titan	183
5.3.4.1	Reintitan	184
5.3.4.2	α -Titan	184
5.3.4.3	β -Titan	184
5.3.4.4	α - β -Titan	184
5.3.5	Leichtbaueignung von Werkstoffen	185
5.4	Schwermetalle	188
5.4.1	Leitfragen	188
5.4.2	Kupfer und Kupferlegierungen	188
5.4.2.1	Reinkupfer	188
5.4.2.2	Messing	190
5.4.2.3	Bronze	191
5.4.3	Nickel und Nickellegierungen	192
5.4.3.1	Reinnickel	192
5.4.3.2	Hochwarmfeste Nickellegierungen	192
5.4.4	Hochschmelzende Metalle	193
5.4.5	Hartmetalle	193
5.5	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	194
5.5.1	Aufgaben	194
5.5.2	Musterlösungen	196

6	Keramische Werkstoffe	
6.1	Lernziele	
6.2	Leitfragen	
6.3	Besonderheiten keramischer	
6.4	Einsatzgebiete für Keramiken	
6.5	Keramikverarbeitung (Sinter	
6.6	Hochleistungskeramiken	
6.7	Übersicht: Keramische Werk	
6.7.1	Silikatkeramik	
6.7.2	Oxidkeramik	
6.7.3	Nichtoxidkeramik	
6.7.4	Hochleistungskeramik	
6.8	Konstruieren mit Keramik	
6.9	Aufgaben zur Selbstüberprüf	
6.9.1	Aufgaben	
6.9.2	Musterlösungen	
7	Kunststoffe	
7.1	Lernziele	
7.2	Aufbau von Kunststoffen	
7.2.1	Leitfragen	
7.2.2	Monomere, Polymer	
7.2.2.1	Additions	
7.2.2.2	Additions	
7.2.2.3	Kondensa	
7.2.2.4	Einfluss d	
7.2.3	Thermoplaste, Elast	
7.2.4	Morphologie	
7.2.5	Zuschlagstoffe	
7.3	Eigenschaften von Kunststof	
7.3.1	Leitfragen	
7.3.2	Thermische Eigensch	
7.3.3	Zugversuch an Kuns	
7.3.4	Kriechen von Kuns	
7.3.5	Viskoelastizität	
7.4	Gebräuchliche Kunststoffe	
7.4.1	Leitfragen	
7.4.2	Thermoplaste	
7.4.2.1	Teilkrista	
7.4.2.2	Amorphe	
7.4.3	Duomere	
7.4.4	Elastomere	
7.5	Kunststoffverarbeitung	
7.5.1	Leitfragen	
7.5.2	Extrusion	
7.5.3	Thermoformen	
7.5.4	Spritzguss	
7.5.5	Übersicht: Weitere V	
7.6	Kunststoffrecycling	
7.6.1	Leitfragen	
7.6.2	Werkstoffliches Recy	
7.6.3	Rohstoffliches Recyc	
7.6.4	Energetisches Recyc	
7.6.5	Schlussfolgerungen	
7.7	Aufgaben zur Selbstüberprüf	

156	6	Keramische Werkstoffe	201
157	6.1	Lernziele	201
158	6.2	Leitfragen	201
158	6.3	Besonderheiten keramischer Werkstoffe	201
159	6.4	Einsatzgebiete für Keramiken	203
159	6.5	Keramikverarbeitung (Sintern)	204
159	6.6	Hochleistungskeramiken	207
159	6.7	Übersicht: Keramische Werkstoffe	209
161	6.7.1	Silikatkeramik	210
161	6.7.2	Oxidkeramik	210
164	6.7.3	Nichtoxidkeramik	212
165	6.7.4	Hochleistungskeramiken im Vergleich	214
166	6.8	Konstruieren mit Keramik	214
167	6.9	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	215
168	6.9.1	Aufgaben	215
168	6.9.2	Musterlösungen	216
168			
171	7	Kunststoffe	219
	7.1	Lernziele	219
175	7.2	Aufbau von Kunststoffen	219
175	7.2.1	Leitfragen	219
175	7.2.2	Monomere, Polymere	220
175	7.2.2.1	Additionspolymerisation als Kettenreaktion	222
175	7.2.2.2	Additionspolymerisation als Stufenreaktion	223
176	7.2.2.3	Kondensationspolymerisation	223
177	7.2.2.4	Einfluss der Monomerstruktur auf die Polymereigenschaften	224
178	7.2.3	Thermoplaste, Elastomere, Duromere	226
178	7.2.4	Morphologie	229
180	7.2.5	Zuschlagstoffe	232
181	7.3	Eigenschaften von Kunststoffen	233
182	7.3.1	Leitfragen	233
182	7.3.2	Thermische Eigenschaften	234
182	7.3.3	Zugversuch an Kunststoffen	236
183	7.3.4	Kriechen von Kunststoffen	239
184	7.3.5	Viskoelastizität	241
184	7.4	Gebräuchliche Kunststoffe	243
184	7.4.1	Leitfragen	243
184	7.4.2	Thermoplaste	243
185	7.4.2.1	Teilkristalline Thermoplaste	244
188	7.4.2.2	Amorphe Thermoplaste	245
188	7.4.3	Duromere	247
188	7.4.4	Elastomere	249
188	7.5	Kunststoffverarbeitung	251
190	7.5.1	Leitfragen	251
191	7.5.2	Extrusion	251
192	7.5.3	Thermoformen	253
192	7.5.4	Spritzguss	254
192	7.5.5	Übersicht: Weitere Verarbeitungsverfahren	255
193	7.6	Kunststoffrecycling	256
193	7.6.1	Leitfragen	257
194	7.6.2	Werkstoffliches Recycling	257
194	7.6.3	Rohstoffliches Recycling	258
196	7.6.4	Energetisches Recycling	259
	7.6.5	Schlussfolgerungen	260
	7.7	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	260

7.7.1	Aufgaben	260
7.7.2	Musterlösungen	265
8	Verbundwerkstoffe	271
8.1	Lernziele	271
8.2	Leitfragen	271
8.3	Klassifizierung der Verbundwerkstoffe	272
8.4	Polymer-Verbundwerkstoffe	273
8.4.1	Beispiele für Polymer-Verbundwerkstoffe	274
8.4.2	Faserverstärkte Kunststoffe	275
8.4.2.1	Auswahl des Matrixmaterials	275
8.4.2.2	Verstärkungsform	276
8.4.2.3	Faserarten	280
8.4.2.4	Anisotropie	281
8.5	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	283
8.5.1	Aufgaben	283
8.5.2	Musterlösungen	284
9	Werkstoffauswahl	287
9.1	Lernziele	287
9.2	Einleitung	287
9.3	Werkstoffspezifikationen	287
9.3.1	Vorgehensweise	288
9.3.2	Gebrauchseigenschaften	289
9.3.3	Ver- und Bearbeitungseigenschaften	290
9.3.4	Umweltverträglichkeit	291
9.4	Informationsquellen	292
9.5	Methoden der Entscheidungsfindung	293
9.5.1	Nutzwertanalyse	293
9.5.2	Performance-Indices	296
9.5.3	Wirtschaftlichkeitsvergleich	299
9.5.4	Ökobilanzen und ganzheitliche Bilanzen	201
9.6	Werkstoffgerechtes Konstruieren	303
Anhang 1	Quantenmechanisches Atommodell und Periodensystem	305
Anhang 2	Miller'sche Indizes	309
Anhang 3	Schrauben- und gemischte Versetzungen	311
Anhang 4	Bezeichnungssysteme für Werkstoffe	313
A4.1	Werkstoffkennzeichnung durch Nummern	313
A4.2	Bezeichnungssysteme für Eisenwerkstoffe nach DIN EN 10 027 und 1560	315
A4.3	Bezeichnung von Nichteisenmetallen	319
A4.4	Bezeichnung von Polymerwerkstoffen	322
Anhang 5	Werkstoffkennwerte	324
Literaturverzeichnis		330
Stichwortverzeichnis		332

1 Einleitung und Gr

1.1 Lernziele

Dieses Kapitel soll Sie mit der Bedeutung eines Produktes vertraut machen und Ihnen diese nahe bringen.

Nach Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie:

- den Einfluss der Werkstoffauswahl auf verschiedene Produkte grundlegend verstehen
- den Zusammenhang von Werkstoffauswahl auf konkrete Beispiele anwenden können
- die Begriffe elastische und plastische Verformung verstehen
- zähes und sprödes Werkstoffverhalten unterscheiden

1.2 Bedeutung der Werkstoffauswahl

Alle Produkte werden aus Werkstoffen hergestellt. Die Bedeutung eines Produktes, seine Umweltfreundlichkeit und seine Wirtschaftlichkeit sind entscheidend vom verwendeten Werkstoff abhängig.

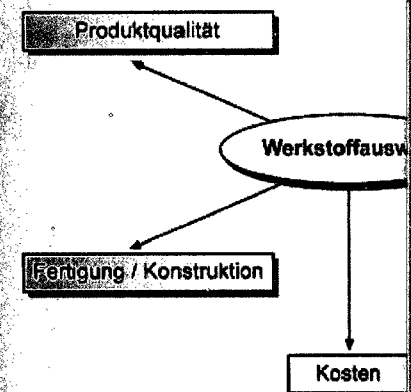


Bild 1.1 Einflussbereiche einer gezielten Werkstoffauswahl

Leider wird dieses in der Praxis häufig vernachlässigt. Die Werkstoffauswahl findet unsystematisch statt („den wir schon kennen“). Dadurch wird der Wettbewerbsdruck dann endlich einflussreich.

Die in den Abschnitten 2.1 bis 2.5 folgenden Kapitel behandeln die gezielte Werkstoffauswahl.

1.2.1 Werkstoffe und Produktfunktio

Die Speicherkapazität von Disketten hängt von der Schicht und deren Dicke ab. Natürlich spielt die Schicht eine entscheidende Rolle.

Heutzutage werden Disketten zunehmend mehrschichtig beschreibbar oder mehrfach beschreibbar. Die Funktionsschichten im Innern der CD sind ebenfalls ein Beispiel für die Bedeutung der Werkstoffauswahl.