

## Vorwort

Die Werkstofftechnik ist eine «Schlüsseltechnologie»: Technische Innovationen sind häufig nur mit neuen Werkstoffen möglich, und eine zielorientierte, systematische Werkstoffauswahl ermöglicht häufig deutliche Kostenreduzierungen sowie Qualitätsverbesserungen. Andererseits führt eine Werkstoffauswahl nach den Methoden «kennen wir nicht, lassen wir lieber die Finger davon» oder «haben wir schon immer so gemacht» dazu, dass die Konkurrenz technologisch und wirtschaftlich davonläuft, oder man ist plötzlich mit unerwarteten Bauteilschäden konfrontiert. Leider passiert das in der Praxis in Deutschland häufig, da dem Werkstoff nicht genug Aufmerksamkeit gewidmet wird.

Dieses Buch soll helfen, in der Werkstoffkundausbildung von Ingenieuren/innen eine Brücke zu schlagen zwischen werkstoffkundlichem Fachwissen und der Anwendung von Werkstoffen in maschinenbaulichen Bereichen. Das Buch soll für die praktischen Konsequenzen der Werkstoffauswahl sensibilisieren und das Grundlagenwissen für eine zielorientierte Werkstoffauswahl vermitteln. Last but not least wurde eine Darstellung gesucht, die Interesse und Spaß (ja, das geht m.E. tatsächlich) an der Werkstoffkunde wecken soll.

In der Darstellung und Struktur orientiert sich dieses Buch eher an amerikanischen als an deutschen Lehrbüchern. So werden z.B. nur wenige Phasendiagramme diskutiert, diese jedoch sehr ausführlich erläutert. Die Stahlkunde ist etwas reduziert zu Gunsten anderer Werkstoffe. Sehr spezielle Themen, wie die 32 Punktsymmetriegruppen inklusive Miller'schen Indizes, die der «normale» Maschinenbauer ohnehin lieber wieder schnell vergisst, wurden fortgelassen oder auf ein Minimum reduziert.

Die Stoffauswahl orientierte sich stets daran, was der «normale Maschinenbauer» im Berufsalltag bei der Werkstoffauswahl und -anwendung benötigt. Hier geht zugebenermaßen die persönliche Erfahrung des Autors ein.

Kapitel 1 soll vor allem für die praktische Bedeutung der Werkstoffkunde sensibilisieren. Es wird empfohlen, dieses Kapitel sorgfältig durchzuarbeiten und sich zu den einzelnen Abschnitten Beispiele aus dem eigenen Erfahrungsumfeld zu überlegen. Kapitel 2 schildert – auf das Nötigste reduziert – den Aufbau von Werkstoffen. Auch hier werden immer wieder praktische Konsequenzen aufgeführt, die der Leser durch eigene Erfahrungen anreichern sollte. Einen Schwerpunkt bildet Kapitel 3, das sich mit Werkstoffkennwerten und -prüfung befasst. Letztlich geht es hier um die Frage, wie ein Werkstoff spezifiziert werden muss, damit er den praktischen Anforderungen in einer speziellen Anwendung gewachsen ist. Die Kapitel 4 bis 8 befassen sich dann mit den klassischen Werkstoffgruppen des Maschinenbaus. Allerdings wurde hier versucht, Detailwissen durch Beziehungswissen zu ergänzen: Welche Möglichkeiten bieten die einzelnen Werkstoffgruppen, welchen Beschränkungen unterliegen sie, welche Vor- und Nachteile zeichnen sie aus? Es geht also eher um einen «roten Faden» bei der Werkstoffauswahl und um Werkstoffgruppen als um einzelne Werkstoffe. Kapitel 9 befasst sich dann mit Methoden einer systematischen zielorientierten Werkstoffauswahl. Diese Darstellung ist eine Besonderheit dieses Buches und spiegelt in besonderem Maße die persönlichen Berufserfahrungen des Autors wider.

Abschließend möchte ich einigen Personen danken, ohne die dieses Buch nicht möglich gewesen wäre: In den schweren Anfangsjahren als Professor profitierte ich

in hohem Maße von der uneigennütigen Unterstützung und Materialbereitstellung durch meine Kollegen Prof. Dr. FUHRMANN und Prof. Dr. VOSS (beide FH Lübeck). Herr GUIDO KWAST (Virtuelle Fachhochschule) las die ersten Versionen des Manuskriptes mit den Augen des fachinteressierten Lernenden und gab mir viele Hinweise für eine Optimierung der Stoffauswahl und Darstellung. Die Studierenden halfen mir über einige Jahre mit ihren Hinweisen bei der Optimierung meines Lehrkonzeptes. Besonders danken möchte ich meiner Frau SUSANNE PUFALL, die mir jahrelang Nachhilfe in Didaktik und Methodik gegeben hat.

## Vorwort zur 3. Auflage

Die ersten beiden Auflagen meines Werkstoffkundebuchs fanden einen erfreulichen Anklang. Ich bedanke mich herzlich für die vielen positiven Zuschriften. Ausdrücklich bedanke ich mich aber auch für die Kritiken, die es mir ermöglichten, Mängel zu erkennen und abzustellen.

Die dritte Auflage wurde wieder gründlich überarbeitet. Das Satzbild wurde durchgehend optimiert, großzügiger und übersichtlicher gestaltet. Die Eisenwerkstoffe und die Werkstoffprüfung werden wie in der vorigen Auflage ausführlich beschrieben. Allerdings sind hier Grenzen gesetzt, da der Buchumfang nicht zu stark zunehmen durfte. Das hat zum einen Kostengründe, zum anderen soll das Buch aber auch weiterhin in einer Werkstoffkudevorlesung von 6 bis 8 SWS im Grundstudium durchgearbeitet werden können. Eine zu starke Ausweitung des Stahl-Kapitels würde zu Lasten der anderen Werkstoffe gehen. Demgegenüber vertritt der Autor auch weiterhin die Meinung, dass Kunst- und Verbundwerkstoffe für den Maschinenbauer mittlerweile ebenso wichtig sind wie Eisenwerkstoffe; jedenfalls hat der Kunststoffverbrauch (gerechnet nach Volumen) Mitte der 80er Jahre den Stahlverbrauch überholt. Der Autor ist auch der festen Ansicht, dass die Kunststoffe und Verbundwerkstoffe, aber auch Exoten wie Keramiken immer weiter vordringen werden. Es wurden daher keine Kürzungen in den Kapiteln für die anderen Werkstoffe vorgenommen.

### Hinweise zur Benutzung des Buches

Jedes Kapitel wird durch formulierte «Lernziele» eingeleitet. Es empfiehlt sich, diese Lernziele gründlich zu lesen. Sie können dann das entsprechende Kapitel zielorientierter durcharbeiten. Gelegentlich werden Sie vielleicht feststellen, dass Sie die Lernziele bereits erreicht haben. Dann können Sie das Kapitel schnell überfliegen oder einzelne Abschnitte überspringen. Wenn Sie ein Kapitel durchgearbeitet haben, lesen Sie die Lernziele noch einmal und überprüfen Sie dabei, ob Sie diese Ziele nach Ihrer Meinung erreicht haben.

«Leitfragen» sollen Sie durch die Abschnitte leiten. Diese Fragen konzentrieren sich auf wesentliche Aspekte der entsprechenden Abschnitte oder Kapitel. Manchen Personen fällt es leichter, Stoff «problemorientiert», d.h. anhand von Fragen, zu bearbeiten. Sie können dann die entsprechenden Kapitel oder Abschnitte beim Lesen nach Hinweisen zu den Fragen durchforsten. Können Sie die Leitfragen bereits problemlos beantworten, so können Sie die entsprechenden Abschnitte bzw. Kapitel überfliegen. Musterlösungen zu den Leitfragen finden Sie am Ende des jeweiligen Kapitels.

Im letzten Abschnitt zu jedem Kapitel finden Sie auch weitere Fragen sowie Musterlösungen zu den Leitfragen und anderen Fragen. Sollten Sie bei der Beantwortung dieser Fragen Probleme haben, arbeiten Sie den entsprechenden Abschnitt nochmals durch.

Und nun: Viel Spaß und viel Erfolg!



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	5
Vorwort zur 3. Auflage .....	7
<b>1 Einleitung und Grundbegriffe .....</b>	<b>17</b>
1.1 Bedeutung der Werkstoffkunde .....	17
1.1.1 Werkstoffe und Produktfunktionalität .....	18
1.1.2 Werkstoffe und Produktqualität .....	18
1.1.3 Werkstoffe und Produktlebensdauer .....	19
1.1.4 Werkstoffe und Kosten .....	20
1.1.4.1 Werkstoffe und Herstellkosten .....	20
1.1.4.2 Werkstoffe und Betriebskosten .....	20
1.1.4.3 Werkstoffe und Entsorgungskosten .....	21
1.1.5 Werkstoff, Fertigung und Konstruktion .....	22
1.1.5.1 Werkstoff und Fertigung .....	22
1.1.5.2 Fertigung und Konstruktion .....	23
1.1.5.3 Werkstoff und Konstruktion .....	23
1.1.5.4 Simultaneous Engineering .....	24
1.2 Grundbegriffe .....	24
1.2.1 Leitfragen .....	25
1.2.2 Elastische Verformung .....	25
1.2.3 Plastische Verformung .....	26
1.2.4 Zähigkeit und Sprödigkeit .....	27
1.3 Aufgaben zur Selbstüberprüfung .....	28
1.3.1 Aufgaben .....	29
1.3.2 Musterlösungen .....	30
<b>2 Aufbau von Werkstoffen .....</b>	<b>33</b>
2.1 Atombau und Periodensystem .....	33
2.1.1 Leitfragen .....	34
2.1.2 Atombau .....	34
2.1.2.1 Chemische Elemente .....	35
2.1.2.2 Die Elektronenhülle .....	37
2.1.3 Periodensystem der Elemente .....	39
2.2 Bindungen .....	40
2.2.1 Leitfragen .....	40
2.2.2 Übersicht über die Bindungsarten .....	41
2.2.3 Ionenbindung .....	42
2.2.4 Kovalente Bindung .....	43
2.2.5 Metallische Bindung .....	44
2.2.6 Sekundäre Bindungen .....	46
2.2.7 Bindungspotenzial und Bindungskräfte .....	48
2.3 Gitterstrukturen .....	50
2.3.1 Leitfragen .....	50
2.3.2 Überblick über Gitterstrukturen .....	51

2.3.3	Das krz-Gitter	53
2.3.4	Das hdp-Gitter	55
2.3.5	Das kfz-Gitter	56
2.3.6	Gleitsysteme	57
2.3.7	Kristallgitter und Werkstoffeigenschaften	59
2.3.7.1	Isotropie und Anisotropie	59
2.3.7.2	Umformbarkeit	60
2.3.7.3	Allotropie	61
2.4	Gitterbaufehler	62
2.4.1	Leitfragen	62
2.4.2	Übersicht über Gitterbaufehler	63
2.4.3	Punktdefekte	64
2.4.4	Versetzungen	66
2.4.5	Korngrenzen	68
2.4.6	Volumendefekte	68
2.4.7	Gitterbaufehler und Werkstoffeigenschaften	69
2.5	Entstehung von Gefügestrukturen	70
2.5.1	Leitfragen	71
2.5.2	Der Kristallisationsvorgang	72
2.5.3	Diffusion	74
2.5.4	Phasendiagramme	76
2.5.4.1	Unlöslichkeit im festen und flüssigen Zustand	79
2.5.4.2	Vollständige Löslichkeit im festen Zustand	80
2.5.4.3	Eutektische Systeme	83
2.5.4.4	Ausscheidungshärtung	87
2.5.4.5	Weitere Phasendiagramme	89
2.5.4.6	Das Hebelgesetz	89
2.6	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	91
2.6.1	Aufgaben	91
2.6.2	Musterlösungen	96
<b>3</b>	<b>Mechanische Werkstoffeigenschaften</b>	<b>105</b>
3.1	Dehnung und Spannung	106
3.2	Belastungsarten	109
3.2.1	Leitfragen	109
3.2.2	Einführung	109
3.2.3	Zugbelastung	110
3.2.4	Druckbelastung	111
3.2.5	Schub- oder Scherbelastung	112
3.2.6	Zusammenhang Zug, Druck und Schub	112
3.3	Mechanische Werkstoffkennwerte	116
3.3.1	Der Zugversuch	116
3.3.1.1	Leitfragen	116
3.3.1.2	Versuchsdurchführung und -auswertung	117
3.3.2	Druck und Schubkennwerte	124
3.3.3	Risszähigkeit	126
3.3.3.1	Leitfragen	127
3.3.3.2	Risszähigkeit	127

3.3.4	Werkstoffermüdung	131
3.3.4.1	Leitfragen	131
3.3.4.2	Wöhlerkurven	132
3.3.4.3	Mechanismen der Materialermüdung	137
3.3.4.4	Rissfortschrittskurven	139
3.3.4.5	Dauerfestigkeitsschaubilder nach SMITH	141
3.3.5	Härteprüfung	143
3.3.5.1	Leitfragen	144
3.3.5.2	Härteprüfung nach VICKERS	144
3.3.5.3	Härteprüfung nach BRINELL	145
3.3.5.4	Härteprüfung nach ROCKWELL	146
3.3.5.5	Allgemeine Betrachtungen zur Härte	147
3.3.6	Kerbschlagbiegeversuch	148
3.3.6.1	Leitfragen	149
3.3.6.2	Versuchsdurchführung und -auswertung	149
3.3.7	Temperatureinflüsse	152
3.3.7.1	Leitfragen	152
3.3.7.2	Spezifische Wärmekapazität	153
3.3.7.3	Spezifische Wärmeleitfähigkeit	154
3.3.7.4	Wärmeausdehnung	156
3.3.7.5	Festigkeit und Temperatur	158
3.3.7.6	Kriechen	159
3.3.8	Korrosion	161
3.3.8.1	Leitfragen	161
3.3.8.2	Chemische Korrosion	161
3.3.8.3	Elektrochemische Korrosion	162
3.3.8.4	Korrosionsarten	165
3.3.9	Reibung und Verschleiß	167
3.3.9.1	Leitfragen	168
3.3.9.2	Reibungs- und Verschleißkennwerte	168
3.3.9.3	Reibung und Verschleiß als Systemeigenschaften	171
3.4	Bedeutung der Werkstoffkennwerte	173
3.4.1	Leitfragen	173
3.4.2	Kennwert Fließgrenze	174
3.4.3	Kennwert Festigkeit	174
3.4.4	Kennwert E-Modul	175
3.4.5	Kennwert Bruchdehnung	175
3.4.6	Kennwert Risszähigkeit	176
3.4.7	Kennwert Dauer-/Zeitfestigkeit	176
3.4.8	Kennwert Härte	176
3.5	Ausblick: Weitere Werkstoffkennwerte und Prüfverfahren	176
3.6	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	177
3.6.1	Aufgaben	177
3.6.2	Musterlösungen	183
4	Eisenwerkstoffe	191
4.1	Herstellung und Struktur von Eisenwerkstoffen	191

4.1.1	Leitfragen	191
4.1.2	Herstellung von Stahl und Gusseisen	192
4.1.3	Gitterstrukturen von Eisen	195
4.1.4	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD)	196
4.1.4.1	Abkühlung eines untereutektoiden Stahls mit C < 0,02%	198
4.1.4.2	Abkühlung eines eutektoiden Stahls mit C = 0,8%	199
4.1.4.3	Abkühlung eines untereutektoiden Stahls mit C-Gehalt zwischen 0,02% und 0,8%	201
4.1.4.4	Abkühlung eines übereutektoiden Stahls mit C > 0,8%	202
4.2	Wärmebehandlungsverfahren für Stähle	204
4.2.1	Leitfragen	204
4.2.2	Glühverfahren für Stähle	204
4.2.2.1	Normalglühen oder Normalisieren	206
4.2.2.2	Weichglühen	207
4.2.2.3	Grobkornglühen	207
4.2.2.4	Rekristallisationsglühen	208
4.2.2.5	Diffusionsglühen (Homogenisieren)	208
4.2.2.6	Spannungsarmglühen	208
4.2.3	Härten und Vergüten von Stahl	209
4.2.3.1	Martensitische Härtung	209
4.2.3.2	Vergüten	212
4.2.3.3	Randschichthärtung	213
4.2.3.4	Einsatzhärtung	214
4.2.3.5	Nitrieren	215
4.2.4	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder	216
4.3	Gebräuchliche Eisenwerkstoffe	218
4.3.1	Leitfragen	218
4.3.2	Stahlarten	218
4.3.2.1	Legierungselemente	218
4.3.2.2	Einteilung der Stähle nach DIN EN 10 020	221
4.3.2.3	Einteilung nach Einsatzgebiet	222
4.3.3	Gusseisentypen	225
4.3.4	Bezeichnung von Eisenwerkstoffen	228
4.3.4.1	Stahlkurznamen nach DIN EN 10 027-1	229
4.3.4.2	Kurznamen für Gusswerkstoffe nach DIN EN 1560	231
4.3.4.3	Werkstoffnummern nach DIN EN 10 027-2	231
4.4	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	232
4.4.1	Aufgaben	232
4.4.2	Musterlösungen	235
5	<b>Nichteisenmetalle</b>	239
5.1	Übersicht	239
5.2	Leichtmetalle	240
5.2.1	Leitfragen	240

5.2.2	Aluminium	241
5.2.2.1	Reinaluminium	242
5.2.2.2	Naturharte Aluminiumlegierungen	243
5.2.2.3	Ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierungen	244
5.2.2.4	Al-Gusslegierungen	246
5.2.2.5	Eloxieren	247
5.2.3	Magnesium	248
5.2.3.1	Reinmagnesium	248
5.2.3.2	Magnesiumlegierungen	249
5.2.4	Titan	250
5.2.4.1	Reintitan	251
5.2.4.2	$\alpha$ -Titan	251
5.2.4.3	$\beta$ -Titan	251
5.2.4.4	$\alpha$ - $\beta$ -Titan	252
5.2.5	Leichtbaueignung von Werkstoffen	253
5.3	Schwermetalle	256
5.3.1	Leitfragen	256
5.3.2	Kupfer und Kupferlegierungen	257
5.3.2.1	Reinkupfer	258
5.3.2.2	Messing	259
5.3.2.3	Bronze	261
5.3.3	Nickel und Nickellegierungen	262
5.3.3.1	Reinnickel	262
5.3.3.2	Hochwarmfeste Nickellegierungen	263
5.3.4	Hochschmelzende Metalle	263
5.3.5	Hartmetalle	264
5.4	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	265
5.4.1	Aufgaben	265
5.4.2	Musterlösungen	268
<b>6</b>	<b>Keramische Werkstoffe</b>	<b>275</b>
6.1	Leitfragen	275
6.2	Besonderheiten keramischer Werkstoffe	276
6.3	Einsatzgebiete für Keramiken	278
6.4	Keramikverarbeitung (Sintern)	280
6.5	Hochleistungskeramiken	283
6.6	Übersicht: Keramische Werkstoffe	286
6.6.1	Silikatkeramik	287
6.6.2	Oxidkeramik	288
6.6.3	Nichtoxidkeramik	290
6.6.4	Hochleistungskeramiken im Vergleich	293
6.7	Konstruieren mit Keramik	293
6.8	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	294
6.8.1	Aufgaben	294
6.8.2	Musterlösungen	295
<b>7</b>	<b>Kunststoffe</b>	<b>297</b>
7.1	Aufbau von Kunststoffen	297

7.1.1	Leitfragen	297
7.1.2	Monomere, Polymere	298
7.1.2.1	Additionspolymerisation als Kettenreaktion	301
7.1.2.2	Additionspolymerisation als Stufenreaktion	302
7.1.2.3	Kondensationspolymerisation	303
7.1.2.4	Einfluss der Monomerstruktur auf die Polymereigenschaften	304
7.1.3	Thermoplaste, Elastomere, Duromere	307
7.1.4	Morphologie	310
7.1.5	Zuschlagstoffe	314
7.2	Eigenschaften von Kunststoffen	314
7.2.1	Leitfragen	315
7.2.2	Thermische Eigenschaften	316
7.2.3	Zugversuch an Kunststoffen	319
7.2.4	Kriechen von Kunststoffen	322
7.2.5	Viskoelastizität	325
7.3	Gebräuchliche Kunststoffe	327
7.3.1	Leitfragen	327
7.3.2	Thermoplaste	327
7.3.2.1	Teilkristalline Thermoplaste	328
7.3.2.2	Amorphe Thermoplaste	333
7.3.2.3	Thermoplastische Elastomere	335
7.3.3	Duromere	336
7.3.4	Elastomere	338
7.4	Kunststoffverarbeitung	341
7.4.1	Leitfragen	341
7.4.2	Extrusion	341
7.4.3	Thermoformen	343
7.4.4	Spritzguss	344
7.4.5	Übersicht: Weitere Verarbeitungsverfahren	346
7.5	Kunststoffrecycling	348
7.5.1	Leitfragen	349
7.5.2	Werkstoffliches Recycling	349
7.5.3	Rohstoffliches Recycling	351
7.5.4	Energetisches Recycling	352
7.5.5	Schlussfolgerungen	353
7.6	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	354
7.6.1	Aufgaben	354
7.6.2	Musterlösungen	360
8	<b>Verbundwerkstoffe</b>	367
8.1	Leitfragen	367
8.2	Klassifizierung der Verbundwerkstoffe	368
8.3	Polymer-Verbundwerkstoffe	370
8.3.1	Beispiele für Polymer-Verbundwerkstoffe	371
8.3.2	Faserverstärkte Kunststoffe	373
8.3.2.1	Auswahl des Matrixmaterials	373
8.3.2.2	Verstärkungsform	374

8.3.2.3	Faserarten	378
8.3.2.4	Anisotropie	380
8.4	Aufgaben zur Selbstüberprüfung	382
8.4.1	Aufgaben	382
8.4.2	Musterlösungen	383
<b>9</b>	<b>Werkstoffauswahl</b>	<b>387</b>
9.1	Einleitung	387
9.2	Werkstoffspezifikationen	388
9.2.1	Vorgehensweise	388
9.2.2	Gebrauchseigenschaften	390
9.2.3	Ver- und Bearbeitungseigenschaften	391
9.2.4	Umweltverträglichkeit	393
9.3	Informationsquellen	394
9.4	Methoden der Entscheidungsfindung	396
9.4.1	Nutzwertanalyse	396
9.4.2	Performance-Indices	400
9.4.3	Wirtschaftlichkeitsvergleich	403
9.4.4	Ökobilanzen und ganzheitliche Bilanzen	406
9.5	Werkstoffgerechtes Konstruieren	409
<b>Anhang 1 Quantenmechanisches Atommodell und Periodensystem</b>		<b>411</b>
<b>Anhang 2 Miller'sche Indizes</b>		<b>415</b>
<b>Anhang 3 Schrauben- und gemischte Versetzungen</b>		<b>419</b>
<b>Anhang 4 Bezeichnungssysteme für Werkstoffe</b>		<b>421</b>
A4.1	Bezeichnung von Eisenwerkstoffen	421
A4.2	Bezeichnungssysteme für Nichteisenmetalle	426
A4.3	Bezeichnung von Polymerwerkstoffen	431
<b>Anhang 5 Werkstoffkennwerte</b>		<b>433</b>
<b>Quellenverzeichnis der Bilder</b>		<b>441</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>443</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>447</b>



# 1 Einleitung und Grundbegriffe

Dieses Kapitel soll Sie mit der Bedeutung der Werkstoffe für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg eines Produktes vertraut machen und Ihnen einige Grundbegriffe der mechanischen Werkstoffeigenschaften nahe bringen. Nach Bearbeitung dieses Kapitels werden Sie

- den Einfluss der Werkstoffauswahl auf Produktfunktionalität, -qualität sowie auf Produktlebensdauer und -kosten anhand verschiedener Beispiele grundlegend erläutern können,
- den Zusammenhang von Werkstoff, Fertigung und Gestaltung grundsätzlich verstanden haben und auf konkrete Beispiele anwenden können,
- die Begriffe elastische und plastische Verformung erklären und korrekt anwenden können,
- zähes und sprödes Werkstoffverhalten unterscheiden und in seinen Auswirkungen einschätzen können.

## 1.1 Bedeutung der Werkstoffkunde

Alle Produkte werden aus Werkstoffen hergestellt. Die Funktionalität, Qualität und Langlebigkeit des Produktes, seine Umweltfreundlichkeit (oder Umweltschädlichkeit) und Wirtschaftlichkeit hängen daher entscheidend vom verwendeten Werkstoff ab, wie Bild 1.1 zeigt.

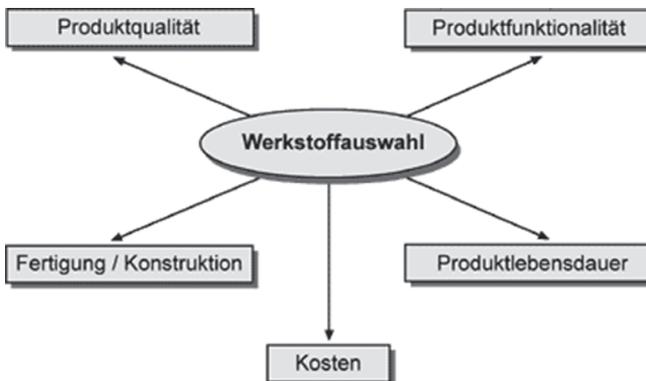


Bild 1.1 Einflussbereiche einer gezielten Werkstoffauswahl

Leider wird dieses in der Praxis häufig nicht hinreichend berücksichtigt und Werkstoffauswahl sowie Werkstoffeinsatz finden unsystematisch und nicht zielorientiert statt («wir nehmen lieber den Werkstoff, den wir schon kennen»). Dadurch wird das technische und wirtschaftliche Optimum nicht erreicht. Wenn der Wettbewerbsdruck dann endlich eine Neuorientierung erzwingt, ist es häufig schon zu spät.

Die in den Abschnitten 2.1 bis 2.4 folgenden Beispiele illustrieren die besondere Bedeutung einer gezielten Werkstoffauswahl.

### 1.1.1 Werkstoffe und Produktfunktionalität

Die Speicherkapazität von Disketten hängt wesentlich von der verwendeten magnetischen Funktionsschicht und deren Dicke ab. Natürlich spielt auch die verwendete Schreib- und Lesetechnik eine entscheidende Rolle.

Heutzutage werden Disketten zunehmend von CDs verdrängt. Ob eine CD nur lesbar (CD-ROM), einmalig beschreibbar oder mehrfach beschreibbar (CD-RW) ist, hängt hauptsächlich von den verwendeten Funktionsschichten im Innern der CD ab.

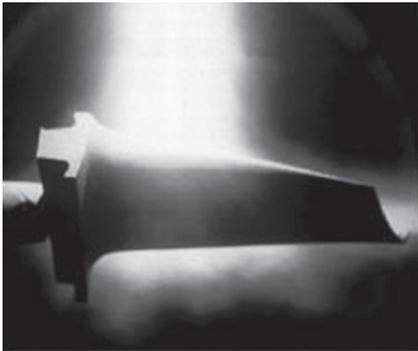


Bild 1.2  
Beschichtung einer Turbinenschaufel mit einer keramischen Schicht im thermischen Spritzverfahren (mit freundlicher Genehmigung der Sulzer Metco AG)

Ein Beispiel aus dem Maschinenbau zeigt Bild 1.2: Der Wirkungsgrad einer Verbrennungskraftmaschine (Prozentsatz der in nutzbare Energie, z.B. Bewegung, umgewandelten Wärme) nimmt mit steigender Verbrennungstemperatur zu. D.h., durch höhere Temperaturen in der Brennkammer einer Turbine kann Treibstoff gespart oder die Leistungsfähigkeit verbessert werden. Die maximal möglichen Verbrennungstemperaturen sind aber maßgeblich durch die verwendeten Werkstoffe bestimmt.

Ein Entwicklungstrend bei Werkstoffen geht daher in Richtung einer höheren Temperaturbeständigkeit (z.B. Nickel-Basislegierungen, Keramiken). Weiterhin können Energieverluste durch bessere thermische Isolation der Brennkammer minimiert werden – auch dieses ist in erster Linie ein Problem hochwarmfester und thermisch isolierender Werkstoffe (z.B. poröse Keramiken oder keramische Beschichtungen metallischer Turbinenschaufeln).

### 1.1.2 Werkstoffe und Produktqualität



Bild 1.3  
CD-RW

Ein kleiner unscheinbarer Dichtring, ein Centartikel, wird in Rohranschlüsse für ein Heizungssystem eingebaut. Zu Beginn der Heizperiode werden die Dichtringe plötzlich alle undicht und verursachen Wasserschäden in zahlreichen Wohnungen mit Folgekosten von mehreren 100 000 €. Erst jetzt werden aufwendige Untersuchungen darüber angestellt, welchen Beanspruchungen der Dichtring in der Praxis ausgesetzt ist und welche Anforderungen sich daraus für das Dichtmaterial ergeben. Selbst die Materialzusammensetzung wird erst jetzt detailliert untersucht.

Einfacher und billiger wäre es gewesen,

- ❑ erst die Einsatzsituation zu analysieren,
- ❑ dann das Dichtmaterial und seine erforderlichen Eigenschaften genau zu spezifizieren (immer schriftlich!) und erst
- ❑ dann die Bestellung aufzugeben.

Auch bei CDs (Bild 1.3) gibt es einen Zusammenhang von Werkstoff und Qualität. Die Zuverlässigkeit der Datenaufzeichnung und der Wiedergabe hängt wesentlich von den für die Funktionsschicht verwendeten Materialien ab.

### 1.1.3 Werkstoffe und Produktlebensdauer

Auch wenn das Bauteil seine Funktion ordnungsgemäß erfüllt, so wird es das nicht ewig tun. Materialermüdung, Korrosion, Verschleiß usw. beschränken die Lebensdauer jedes Produktes.

Ein Flugzeugbauer z.B. legt sein Flugzeug für eine bestimmte Lebensdauer aus. Dazu benötigt er Kenntnis über die Ermüdungsvorgänge in Aluminium – wie soll er sonst die Lebensdauer garantieren können. Kenntnis über die Risswachstumsgeschwindigkeit in Aluminium ist auch wichtig bei der Festlegung der Wartungsintervalle, bei denen nach Rissen gesucht wird.

Andererseits kann die Lebensdauer einer Nockenwelle gesteigert werden, wenn man die Ermüdungsvorgänge im Stahl kennt und weiß, wie man sie beeinflussen kann (Randschichthärtung, Einsatzhärtung, Kugelstrahlen).

Leider können auf Aluminium nicht die gleichen dauerfestigkeitssteigernden Verfahren angewendet werden wie auf Stahl. Man muss also auch etwas über die Unterschiede der verschiedenen Werkstoffe wissen.

Die in Bild 1.4 gezeigte Bowle-Tasse aus dem Kunststoff PMMA, die ihre Funktion anfangs sicher gut erfüllte, hat nach einiger Zeit ihren «Geist aufgegeben», da der Kunststoff den einwirkenden Medien nicht gewachsen war. Andere (teurere) Kunststoffe hätten nicht so rasch Risse bekommen.



Bild 1.4  
Bowle-Tasse aus PMMA mit  
deutlicher Materialschädigung

### 1.1.4 Werkstoffe und Kosten

In dem zusammenwachsenden globalen Markt entscheiden Kosten immer häufiger über Erfolg oder Misserfolg eines Produktes. Die verwendeten Werkstoffe spielen in diesem Zusammenhang eine entscheidende Rolle. Sie haben einen wichtigen Einfluss auf die Herstell-, Betriebs- und Entsorgungskosten.

#### 1.1.4.1 Werkstoffe und Herstellkosten

Bei den Herstellkosten für ein Produkt gehen natürlich die Werkstoffpreise ein. Viel entscheidender sind jedoch häufig die Ver- und Bearbeitungskosten. Es kann daher günstiger sein, einen teureren Werkstoff zu verwenden (und zwar umso eher, je höher die Stückzahl ist).

#### 1.1.4.2 Werkstoffe und Betriebskosten

Der Kunde interessiert sich dagegen eher für die Betriebskosten. Die können z.B. gesenkt werden durch Verwendung korrosions-, verschleißbeständiger oder reparaturfreundlicher Materialien sowie durch leichtere Werkstoffe (Treibstoffverbrauch). Dabei können jedoch die Herstellkosten ansteigen. Der Produzent muss dann herausfinden, ob der Kunde bereit ist, einen höheren Einstandspreis zu zahlen, um dadurch niedrigere Betriebskosten zu bekommen. Eine Airline z.B. ist bereit, einen höheren Preis für ein Flugzeug zu zahlen, wenn der Mehrpreis nach einer bestimmten Anzahl Jahren durch niedrigere Betriebskosten eingespart ist. Ein privater PC-Nutzer sucht dagegen i.d.R. einfach den billigsten PC mit bestimmten Leistungsdaten aus. Die Folgekosten in Form von Geld oder Arbeitszeit sind dann häufig eine böse Überraschung.



Bild 1.5  
Bohrfräser GLOBAL® NC-VHM

Dies verdeutlicht auch das folgende Beispiel: Vergleicht man Bohrfräser (Bild 1.5), die z.B. zum Fräsen einer Nut eingesetzt werden können, so zeigt ein Preisvergleich, dass die Fräser sehr unterschiedliche Preise haben. Das liegt an den unterschiedlichen Qualitäten und Leistungen, die die Werkzeuge durch unterschiedliche Materialien und Beschichtungen aufweisen.

Tabelle 1.1 zeigt einen Vergleich verschiedener Bohrfräser. Die in der Tabelle angegebenen Vergleichsdaten beziehen sich auf das Fräsen einer Nut mit folgenden technischen Daten: bearbeiteter Werkstoff C45, Fräser-Durchmesser: 16 mm, Zähnezahl: 3, Eingriffstiefe: 8 mm und Eingriffsbreite: 16 mm.

Die Gegenüberstellung der Fräser macht deutlich, dass der VHM-Fräser, der mit TiAlN beschichtet ist, den höchsten Anschaffungspreis hat. Durch eine längere Standzeit und die größere Zerspanungsgeschwindigkeit sinken jedoch die Zeiten der Maschinenbelegung und damit die Maschinenkosten.

Eine Berücksichtigung der Werkzeug- und Maschinenkosten ergibt, dass mit dem TiAlN beschichteten VHM-Fräser die niedrigsten Kosten für das Fräsen einer Nut erreicht werden können (Bild 1.6).

Tabelle 1.1 Kostenvergleich von Bohrfräsern nach Techno-Span® Maschinen und Werkzeuge, Willich

Werkzeug-Typ	relative Werkzeugkosten	Spanvolumen cm <sup>3</sup> /min	Maschinenbelegung*	Standzeit Faktor	Kosten pro 1 000 mm Nut in Euro	Anteil Maschinenkosten**	Anteil Werkzeugkosten***
HSS M42 TiCN- beschichtet	1	29	1,00	1	4,66	99,77%	0,23%
VHM unbeschichtet	1,3	76	0,30	1,3	1,82	99,75%	0,25%
VHM TiCN- beschichtet	1,6	124	0,15	1,63	1,11	99,77%	0,23%
VHM TiAlN- beschichtet	1,6	161	0,12	1,55	0,85	99,76%	0,24%

\* Maschinenbelegung für 1 000 mm Nutlänge;

\*\* Maschinenstunde: berechneter Wert 61,40 €/h;

\*\*\* Werkzeugkosten pro 1 000 mm Nut in Euro. (HSS: high speed steel, VHM: Vollhartmetall, TiCN und TiAlN: spezielle Hartstoffbeschichtungen)

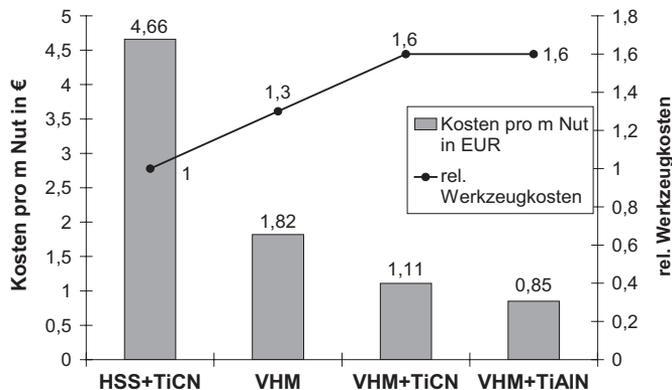


Bild 1.6 Kostenvergleich von Bohrfräsern unterschiedlicher Qualität nach Techno-Span® Maschinen und Werkzeuge, Willich

### 1.1.4.3 Werkstoffe und Entsorgungskosten

Zunehmend wichtig werden auch die Entsorgungskosten für ein Produkt, die i.d.R. vom Endnutzer zu tragen sind (Beispiel: Altölverordnung, Altfahrzeugverordnung).

Auch für die Entsorgungskosten ist der verwendete Werkstoff entscheidend: Kann ich meine Altmaterialien als Wertstoffe verkaufen (z.B. wenn sie gut recyclebar sind) oder zumindest kostengünstig entsorgen? Kann ich die wieder verwertbaren Materialien gut von den anderen Materialien trennen? Muss ich einen Teil meiner Altprodukte als Sondermüll teuer entsorgen?

Die Summe von Herstellkosten, Betriebs- und Entsorgungskosten wird auch als Life Cycle Costs eines Produkts bezeichnet.

### 1.1.5 Werkstoff, Fertigung und Konstruktion

Auch heute noch findet Produktentwicklung häufig **sequenziell** statt:

Konstruktion → Werkstoffauswahl → Fertigung

Tatsächlich hängen Werkstoffauswahl, Fertigungsverfahren und Konstruktion aber eng zusammen. Bild 1.7 verdeutlicht diese wechselseitigen Abhängigkeiten.

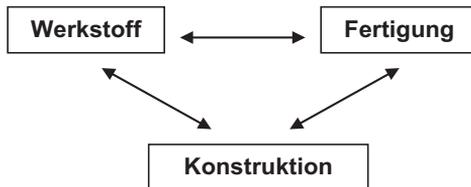


Bild 1.7 Wechselwirkungen zwischen Werkstoff, Konstruktion und Fertigung

Nur durch die gleichzeitige Bearbeitung und Berücksichtigung der drei Bereiche Konstruktion, Fertigungsverfahren und Werkstoffauswahl lassen sich optimale Ergebnisse erzielen. Man spricht in diesem Fall von Simultaneous oder Concurrent Engineering.

#### 1.1.5.1 Werkstoff und Fertigung

Für den Verpackungssektor soll eine Schale aus dem Kunststoff Polypropylen (PP) hergestellt werden. Das kann auf zweierlei Weise geschehen:

1. Beim Thermoformverfahren wird eine plane Kunststoffplatte erwärmt und anschließend tiefgezogen. Hierfür muss die geschmolzene Kunststoffplatte einen hinreichenden inneren Zusammenhalt haben, um nicht zu zerfließen oder zu zerreißen.
2. Beim Spritzgussverfahren wird der geschmolzene Kunststoff in eine Hohlform eingespritzt. Dazu muss die Schmelze möglichst leicht fließen.

Der Kunststoff, der für das Thermoformen verwendet werden kann, hat i.d.R. keine hinreichende Fließfähigkeit für den Spritzguss, obwohl es sich in beiden Fällen um Polypropylen handelt. Es gibt daher verschiedene Varianten des gleichen Werkstoffs, die speziell auf bestimmte Verarbeitungsverfahren abgestimmt wurden.

Das Gleiche gilt auch für andere Werkstoffe: Gusslegierungen lassen sich i.d.R. schlecht umformen. Knetlegierungen lassen sich gut umformen (biegen, tiefziehen, schmieden, ...), aber nicht so gut zu Gussbauteilen verarbeiten. Für die mechanische Bearbeitung gibt es häufig spezielle Automatenlegierungen (kommt von dem Wort Bearbeitungsautomaten). Die Werkzeugstandzeit hängt extrem vom bearbeiteten Werkstoff ab.

### 1.1.5.2 Fertigung und Konstruktion

Man glaubt es kaum, aber es kommt tatsächlich häufig vor: Die Konstrukteure erstellen ihre Bauteilzeichnungen und legen dann den zu verwendenden Werkstoff fest. Erst danach gehen sie mit den Zeichnungen in die Werkstatt und erhalten eine klare Abfuhr: «... so nicht machbar». Also muss die gesamte Konstruktion überarbeitet werden und evtl. ein neuer für das Fertigungsverfahren geeigneter Werkstoff gewählt werden. Folge: Zeit- und Geldverlust.

Für die verschiedenen Fertigungsverfahren gibt es spezifische Gestaltungsrichtlinien, die berücksichtigt werden müssen, damit das Bauteil herstellbar ist. Beispiele für solche Richtlinien sind: minimale Biegeradien (ohne Einreißen des Materials), minimale Wandstärken und maximale Fließwege für Gussbauteile, Entformungsschrägen in Guss- oder Tiefziehwerkzeugen, maximale Hinterschnidungen usw.

### 1.1.5.3 Werkstoff und Konstruktion

Wenn sich der Konstrukteur für ein bestimmtes Fertigungsverfahren entscheidet, so entscheidet er sich damit implizit zugleich für bestimmte Werkstoffe. Diese haben jedoch auch in anderen Gebieten bestimmte Eigenschaften, die der Konstrukteur entsprechend berücksichtigen muss:

- ❑ Gusswerkstoffe sind häufig spröder und schlagempfindlicher sowie korrosionsempfindlicher als Knetlegierungen.
- ❑ Besonders leichtfließende Kunststoffe für den Spritzguss haben i.d.R. eine geringere Festigkeit, Zähigkeit und Medienbeständigkeit als andere Varianten des gleichen Werkstoffs. Dabei kommt es gelegentlich zu Zielkonflikten: Der Fertigungstechniker wünscht eine möglichst gute Fließfähigkeit (= niedrige Viskosität), der Konstrukteur eine hohe Festigkeit.

Für einzelne Werkstoffe gibt es besondere Gestaltungsrichtlinien, die dann unter Begriffen wie «kunststoffgerechte Konstruktion» oder «keramikgerechte Konstruktion» zusammengefasst werden.

Weitere Beispiele:

- ❑ Schnappverbindungen (Schlauchkupplungen) aus Kunststoffen neigen dazu, «auszuleiern», wenn man das Kriechen bzw. die Relaxation der Kunststoffe nicht berücksichtigt.
- ❑ Keramiken sollten im Einsatz keinen Zugkräften (sondern möglichst nur Druckkräften) ausgesetzt werden.
- ❑ Metallbauteile sollten so gestaltet werden, dass keine Korrosion auftreten kann (Materialkombinationen, Hohlräume, Spalten usw.)



Bild 1.8  
Fahrrad aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (Scheffer Engineering, Pforzheim)

Ein Bauteil, das im Gussverfahren gefertigt wird, muss also eine völlig andere Gestalt haben als ein Blechbauteil für den gleichen Zweck. Soll dieses Bauteil aus Kunststoffen bestehen, so muss es wiederum völlig anders konstruiert werden, als wenn es aus Keramik hergestellt wird.

Die ungewöhnliche Form des in Bild 1.8 abgebildeten Fahrrads aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) ist kein Gag. Es ist vielmehr ein Beispiel dafür, wie sich Werkstoff, Konstruktion und Fertigung gegenseitig beeinflussen. CFK wird völlig anders verarbeitet als z.B. Stahl und verhält sich unter Belastung auch anders.

#### 1.1.5.4 Simultaneous Engineering

Bereits in der Konzeptphase für ein Produkt sollten die drei Aspekte Gestalt, Werkstoff und Fertigung gleichzeitig betrachtet werden (Simultaneous Engineering, s. Bild 1.9). Wird dieses nicht getan, so kann es sein, dass die Konstruktion nicht für die Fertigung optimiert ist (anstelle eines design for manufacturing, d.h. einer fertigungsgerechten Konstruktion), nicht dem Werkstoff angemessen ist (anstelle einer werkstoffgerechten Konstruktion) oder dass der Werkstoff nicht technisch und wirtschaftlich optimal ausgesucht wurde. Folgen sind häufig Verluste an Innovation, Zeit und Geld.



Bild 1.9 Rolle der Werkstoffkunde im Produktentwicklungsprozess

## 1.2 Grundbegriffe

Bevor wir die Werkstoffe besprechen, sollen einige Grundbegriffe differenziert werden, die in den folgenden Kapiteln immer wieder auftauchen:

- elastische Verformbarkeit (s. Abschnitt 1.2.2),
- plastische Verformbarkeit (s. Abschnitt 1.2.3) sowie
- Zähigkeit und Sprödigkeit (s. Abschnitt 1.2.4).

In Kapitel 3 werden diese Begriffe dann genauer untersucht und es werden entsprechende Messverfahren erläutert.

### 1.2.1 Leitfragen

Wenn Sie die folgenden Fragen (ohne zu raten und zu schummeln) richtig beantworten können, können Sie Abschnitt 1.2 überspringen (müssen dieses aber nicht). Musterlösungen zu den Leitfragen finden Sie am Ende des Kapitels 1.

Sollten Sie diese Fragen noch nicht beantworten können, ist das auch nicht schlimm. Dann lassen Sie sich durch diese Fragestellungen durch den Abschnitt leiten. Das wird Ihnen helfen, das Thema problemorientiert zu bearbeiten.

---

#### Leitfrage 1.1



Wie unterscheiden sich elastische und plastische Verformung?

---

#### Leitfrage 1.2



Welche der folgenden Aussagen treffen zu?

Ein zäher Werkstoff ...

- a) zeichnet sich durch seine große elastische Verformbarkeit aus.
- b) wird durch Wärmebehandlung in der Regel noch zäher.
- c) erträgt eine große plastische Verformung.
- d) ist besonders hart.
- e) ist unempfindlich gegen Schläge und Stöße.
- f) Keine der oben genannten Aussagen trifft zu!

---

#### Leitfrage 1.3



Der begriffliche Gegensatz zu zäh ist \_\_\_\_\_

### 1.2.2 Elastische Verformung

---

#### Versuch



Nehmen Sie die Metalllasche aus einem Schnellhefter. Lassen Sie diese Lasche über die Tischkante hängen und halten Sie sie fest. Biegen Sie die Lasche leicht mit einem Finger durch. Wenn Sie den Finger wieder fortnehmen, federt die Lasche zurück. Die Verformung ist reversibel.



### Definition

Eine **elastische Verformung** ist reversibel. Der Widerstand gegen diese elastische Verformung wird als **Steifigkeit** bezeichnet. Als **Elastizität** bezeichnet man die Fähigkeit zu elastischer Verformung.

Also: Ein steifes Bauteil verformt sich nur wenig bei Belastung (Werkbank), ein elastisches Bauteil verformt sich stark (Sitzpolster, Dichtring). In jedem Fall verschwindet die Verformung nach Entlastung (das Bauteil soll im Gebrauch ja schließlich nicht seine Form verlieren).

Jedes Bauteil verformt sich bei Belastung elastisch, das eine mehr (Baumäste im Sturm), das andere weniger (Wohnhaus im Sturm – aber das Knarren von Dachbalken bei Sturm ist ein Anzeichen für elastische Verformungen). Der Konstrukteur muss entscheiden, welche elastischen Verformungen für einen gegebenen Fall zulässig oder erforderlich sind.

Elastizität hat nichts mit Brechen oder dauerhafter Umformung (→ s. plastische Verformung) zu tun.



### Beispiel



Achten Sie beim nächsten Urlaubsflug mal darauf: Ein Flugzeugflügel macht im Flug sichtbare elastische Verformungen (sehen Sie einmal genau hin). Mit diesen Verformungen reagiert der Flügel auf Belastungsschwankungen durch Böen und Flugmanöver. Jedoch dürfen die Verformungen nicht zu groß werden, da ansonsten die Strömung gestört wird oder einfach die Mechaniken (Landeklappen usw.) blockieren. Ein Roboterarm, der Teile auf mm-Bruchteile genau ablegen soll, darf sich selbst nicht zu stark durchbiegen. Ein Sitzpolster dagegen soll sich dem Gesäß, ein Dichtring der Dichtfläche anpassen. In jedem Fall verschwindet die Verformung mehr oder weniger schnell nach der Entlastung.

Der Kennwert, der den Widerstand gegen elastische Verformung bezeichnet, heißt **E-Modul**. Der Kehrwert des E-Moduls ist die **Nachgiebigkeit**.

## 1.2.3 Plastische Verformung



### Versuch

Nehmen Sie die Metalllasche aus einem Schnellhefter. Lassen Sie diese Lasche über die Tischkante hängen und halten Sie sie fest. Biegen Sie die Lasche leicht mit einem Finger durch. Wenn Sie den Finger wieder fortnehmen, federt die Lasche

zurück. Die Verformung ist reversibel bzw. elastisch. Biegen Sie die Metallasche immer weiter, so geht ab einem bestimmten Punkt die Verformung nach Entlastung nicht mehr vollständig zurück. Nur ein Teil der Verformung ist elastisch. Der bleibende Teil der Verformung ist plastisch.

### Definition



Eine **plastische Verformung** ist irreversibel. Sie tritt auf, wenn die Belastung ein bestimmtes Maß, die **Fließgrenze**, überschreitet. Die Fließgrenze ist also ein Maß für den Widerstand gegen plastische Verformung. Die Fähigkeit zu plastischer Verformung wird als **Umformbarkeit** (bitte nicht mit Elastizität verwechseln!) bezeichnet.

Die Umformbarkeit ist häufig eine wichtige fertigungstechnische Größe. Im Gebrauch soll sich das Bauteil i.d.R. nicht plastisch verformen. Jedoch stellt die plastische Verformbarkeit eines Bauteils eine gewisse Sicherheitsreserve im Fall einer Überbeanspruchung dar.

### Beispiel



Die Verformungen des Flugzeugflügels dürfen auf keinen Fall plastisch werden. Ebenso sollte sich der Kotflügel Ihres geliebten Pkw nicht dauerhaft verformen. Wenn Sie aber einmal einen Auffahrunfall haben, dann gibt die plastische Verformbarkeit der Knautschzone Ihres Pkw Ihnen Sicherheit.

Eine plastische Verformung wird stets von einer elastischen Verformung begleitet, die jedoch nach Entlastung wieder verschwindet. Die Gesamtverformung ist die Summe von plastischer und elastischer Verformung.

## 1.2.4 Zähigkeit und Sprödigkeit

Die meisten Metalle verhalten sich folgendermaßen:

- Bei Belastung verformen sie sich zunächst elastisch.
- Bei Überschreitung der Fließgrenze verformen sie sich plastisch (und elastisch).
- Nach ausgedehnter plastischer Verformung brechen sie.

### Definition



Werkstoffe, die eine solch ausgeprägte plastische Verformbarkeit aufweisen, werden als **zäh** bezeichnet. **Spröde** Werkstoffe dagegen verformen sich nur in geringem Maße oder gar nicht plastisch.

Typische Beispiele für spröde Werkstoffe sind Glas oder Keramik: Diese Werkstoffe verformen sich unter Belastung elastisch bis direkt zum Bruch. Aber auch einige Kunststoffe verhalten sich so: Ein Kunststofflineal können Sie leicht elastisch biegen, dann aber bricht es plötzlich und ohne Vorwarnung.

**Versuch**

Nehmen Sie ein Gummiband und dehnen Sie es immer weiter. Wenn Sie entlasten, federt das Gummiband fast vollständig zurück: Die große Verformung des Gummibandes ist also elastisch.

Jetzt dehnen Sie das Gummiband so lange, bis es reißt. Nach dem Zerreißen federt das Gummiband wieder fast vollständig zurück. Die Verformung war also wiederum fast rein elastisch, wenn auch sehr groß. Da keine wesentliche plastische Verformung zurück bleibt, ist das Gummiband also spröde gerissen.

Bei der Verformung eines Bauteils müssen Sie Arbeit leisten. Verformung bedeutet Weg, und für diese Verformung müssen Sie eine gewisse Kraft aufbringen. Vereinfacht kennen Sie vielleicht noch aus der Schule:

$$\text{Arbeit (W)} = \text{Kraft (F)} \cdot \text{Weg (s)}$$

Diese Formel gilt genau genommen nur bei konstanter Kraft. Korrekter (aber dafür müssen Sie die Integralrechnung kennen) müsste es heißen:

$$W = \int_a^b F \cdot ds$$

Da ein zäher Werkstoff größere Verformungen zulässt, nehmen diese Werkstoffe tendenziell mehr Energie auf, bevor sie brechen, als dieses bei spröden Werkstoffen der Fall ist.

Das spielt z.B. bei Schlag- oder Stoßbelastungen (Staubsaugergehäuse!) eine Rolle: Spröde Werkstoffe sind empfindlich gegen Schlag. Darum ist Campinggeschirr nicht aus Porzellan, sondern aus – eigentlich weniger festem – Kunststoff. Früher hat man für solche Zwecke Metallgeschirr verwendet. Ihr Kotflügel bekommt bei einem Stoß eine Beule, die Windschutzscheibe zerspringt in unzählige Scherben.

### 1.3 Aufgaben zur Selbstüberprüfung

Sie haben jetzt bereits eine ganze Reihe neuer Begriffe kennen gelernt. Die sorgfältige Unterscheidung dieser Begriffe ist sehr wichtig für die folgenden Kapitel. Darum legen Sie an dieser Stelle eine kurze Pause ein und prägen sich die Begriffe und ihre Bedeutung noch einmal genau ein. Anschließend beantworten Sie bitte die nachfolgenden Fragen.

Antworten finden Sie am Ende dieses Kapitels auf der folgenden Seite. Aber beschummeln Sie sich nicht selbst durch vorzeitiges «Abgucken».

### 1.3.1 Aufgaben

#### Aufgabe 1.1

Welche Aussage trifft zu?

Simultaneous Engineering bedeutet, dass

- die Produktentwicklung sequentiell abläuft (Konstruktion → Werkstoffauswahl → Fertigung).
- schon in der Konzeptionsphase für ein Produkt die drei Aspekte Gestalt, Werkstoff und Fertigung gleichzeitig betrachtet werden.
- die werkstoffgerechte Konstruktion die fertigungsgerechte Konstruktion abgelöst hat.
- die fertigungsgerechte Konstruktion die werkstoffgerechte Konstruktion abgelöst hat.

#### Aufgabe 1.2

Früher bestanden Pkw-Stoßfänger aus verchromtem Stahl, heute aus Kunststoff. Welche Vorteile bieten die Kunststoffstoßfänger, welche Nachteile nimmt man dafür in Kauf?

#### Aufgabe 1.3

Warum besteht ein Locher aus Stahl, aber der Telefonhörer aus Kunststoff?

#### Aufgabe 1.4

Welche Anforderungen muss der Werkstoff eines Staubsaugergehäuses erfüllen?

#### Aufgabe 1.5

Welche Aussagen treffen zu?

- Der Begriff Umformbarkeit kennzeichnet die Elastizität eines Werkstoffs.
- Der Widerstand gegen plastische Verformung wird als Steifigkeit bezeichnet.
- Eine elastische Verformung wird irreversibel, sobald die Fließgrenze überschritten wird.
- Der Kennwert, der den Widerstand gegen elastische Verformung bezeichnet, heißt Fließgrenze.
- Keine der oben genannten Aussagen trifft zu.

#### Aufgabe 1.6

Welche Aussage trifft zu?

Ein zäher Werkstoff ...

- zeichnet sich durch seine große elastische Verformbarkeit aus.
- wird durch Wärmebehandlung in der Regel noch zäher.
- erträgt eine große plastische Verformung.
- ist aufgrund seiner Härte unempfindlich gegen Schläge.
- Keine der oben genannten Aussagen trifft zu!

#### Aufgabe 1.7

Welcher der folgenden Werkstoffe ist elastisch?

- Stahl
- Kitt

- c) Gummi
- d) Keiner der oben genannten Werkstoffe ist elastisch.
- e) Alle oben genannten Werkstoffe sind elastisch.

### Aufgabe 1.8

Welcher der folgenden Begriffe passt auf einen Werkstoff, den Sie schmieden wollen:

- a) elastisch
- b) plastisch
- c) steif
- d) hart

### Aufgabe 1.9

Der begriffliche Gegensatz zu zäh ist \_\_\_\_\_.

### Aufgabe 1.10

Wie unterscheiden sich elastische und plastische Verformung?

## 1.3.2 Musterlösungen

*Zu Leitfrage 1.1:*

Die elastische Verformung ist reversibel, bildet sich also nach Entlastung von selbst zurück. Die plastische Verformung ist irreversibel, also bleibend.

*Zu Leitfrage 1.2:*

Ein zäher Werkstoff ...  
erträgt eine große plastische Verformung (c) und ist unempfindlich gegen Schläge und Stöße (e).

*Zu Leitfrage 1.3:*

Der begriffliche Gegensatz zu zäh ist **spröde**.

*Zu Aufgabe 1.1:*

Aussage b: Simultaneous Engineering bedeutet, dass schon in der Konzeptionsphase für ein Produkt die drei Aspekte Gestalt, Werkstoff und Fertigung gleichzeitig betrachtet werden.

*Zu Aufgabe 1.2:*

Vorteile der Kunststoffstoßfänger:

- preiswerte Herstellung im Spritzgussverfahren,
- leichter,
- Kunststoffe sind elastischer, d.h., sie vertragen (z.B. bei kleinen «Einparkrempeln») größere elastische Verformungen ohne bleibende Schäden,
- keine Korrosion;
- Nachteile:
- Wenn die Elastizitätsgrenze überschritten wird, kommt es zu irreparablen Schäden (Risse, Bruch). Stahl-Stoßfänger verformen sich dagegen plastisch (Beulen).

*Zu Aufgabe 1.3:*

Der Locher wird hoch beansprucht und muss entsprechend fest und steif sein.

Der Telefonhörer wird nicht hoch beansprucht. Er muss eine gewisse Formstabilität haben und hinreichend schlagzäh (kann ja mal herunterfallen) und kratzfest sein. Für beide Anforderungen reichen Kunststoffe aus. Kunststoffe lassen sich aber im Spritzguss preiswert zu beliebigen Geometrien verarbeiten und dabei leicht einfärben.

*Zu Aufgabe 1.4:*

Anforderungen an Staubsaugergehäuse: formstabil/steif, schlagzäh, leicht, gewisse Kratzfestigkeit, optisch hochwertige Oberfläche, darf sich nicht zu stark statisch aufladen beim Rutschen über Teppichböden.

*Zu Aufgabe 1.5:*

- a) ist falsch, da mit »Umformung« eine dauerhafte, d.h., plastische Verformung gemeint ist.
- b) ist falsch, da «Steifigkeit» den Widerstand gegen elastische Verformung bezeichnet.
- c) ist falsch, da mit Überschreiten der Fließgrenze die plastische Verformung einsetzt.
- d) ist falsch, da der E-Modul den Widerstand gegen die elastische Verformung bezeichnet. Der Widerstand gegen die plastische Verformung wird durch die Fließgrenze (Streckgrenze oder Dehngrenze) angegeben.
- e) ist die einzige richtige Antwort.

*Zu Aufgabe 1.6:*

- a) Falsch: Gummi ist zweifellos elastisch, aber trotzdem kerbempfindlich (s. Nadelstich in Luftballon).
- b) Kann sein, muss aber nicht. Eine Wärmebehandlung kann einen Werkstoff auch hart und spröde machen (Härten von Stahl).
- c) Richtig.
- d) Falsch: «Unempfindlich gegen Schläge» stimmt zwar, «hart **und** unempfindlich gegen Schläge» passt nicht zusammen.

*Zu Aufgabe 1.7:*

Gummi. Kitt ist **plastisch**.

*Zu Aufgabe 1.8:*

plastisch

*Zu Aufgabe 1.9:*

spröde

*Zu Aufgabe 1.10:*

Eine elastische Verformung ist reversibel, eine plastische Verformung ist irreversibel.



## 2 Aufbau von Werkstoffen

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Aufbau von Werkstoffen auf verschiedenen Ebenen: vom Atom über die Bindungen bis zur Kristallstruktur. Es wird erläutert, wie die verschiedenen Strukturen entstehen und wie sie die Gebrauchseigenschaften der Werkstoffe beeinflussen. Die Lernziele dieses Kapitels sind:

- Sie sollen für ein beliebiges chemisches Element den Atomaufbau nach dem Bohr'schen Atommodell aus den Angaben des Periodensystems (Ordnungszahl, Periode, Hauptgruppe) entwickeln und skizzieren können.
- Sie sollen die verschiedenen Bindungsarten begrifflich und hinsichtlich ihrer Eigenschaften unterscheiden können und aus dem Atomaufbau der Bindungspartner (Elektronegativität) abschätzen können, welche Bindungen entstehen.
- Sie sollen die drei wichtigsten Gittertypen (krz, kfz und hdp) beschreiben und ihren Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften über die Anzahl der Gleitsysteme erläutern können.
- Sie sollen die typischen Gitterbaufehler benennen und begrifflich unterscheiden sowie ihren Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften (Umformbarkeit, Festigkeit) qualitativ beschreiben können.
- Sie sollen die Vorgänge bei der Erstarrung von Schmelzen qualitativ erläutern können. Dabei sollen Sie erklären können, wann sich eine amorphe, eine feinkörnige und eine grobkörnige Struktur bildet.
- Sie sollen die Abkühlvorgänge von Zweistoffsystemen mit vollständiger Mischbarkeit in der festen und in der flüssigen Phase sowie von Zweistoffsystemen mit teilweiser Mischbarkeit in der festen Phase (Eutektikum, Ausscheidungshärtung) anhand von Phasendiagrammen erläutern können.

### 2.1 Atombau und Periodensystem

Um makroskopische Werkstoffeigenschaften zu verstehen, empfiehlt es sich, den mikroskopischen Aufbau und die Unterschiede verschiedener Werkstofftypen kennen zu lernen und wesentliche Mechanismen an einfachen Ausschnitten realer Bauteile zu studieren. Bild 2.1 versucht dieses zu verdeutlichen.

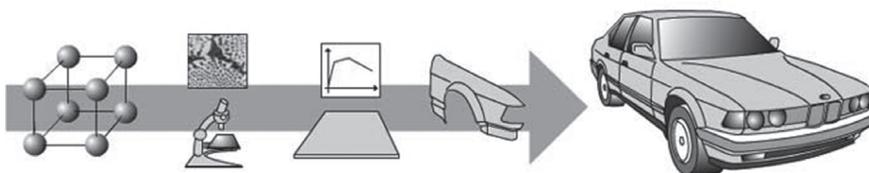


Bild 2.1 Vom Atom über den Werkstoff zum Produkt

Werkstoffe sind wie alle anderen Feststoffe aus einer Vielzahl von Atomen oder Molekülen (= Verbindungen von Atomen) aufgebaut. Die physikalisch-chemischen

Eigenschaften dieser Atome bestimmen dabei die möglichen Bindungen zu gleichen und anderen Atomen und darüber hinaus auch die Eigenschaften eines Werkstoffs.

Das Wissen um den Bau von Atomen ist daher unerlässlich, wenn es darum geht, die Eigenschaften von Werkstoffen einschätzen bzw. vorhersagen zu können.

### 2.1.1 Leitfragen

Wenn Sie die folgenden Fragen bereits beantworten können, können Sie die Abschnitte 2.1.2 und 2.1.3 schneller bearbeiten oder überspringen. Natürlich dürfen Sie aber auch einfach alle Abschnitte der Reihe nach durcharbeiten. Weitere Übungsaufgaben finden Sie am Ende dieses Kapitels. Diese sollten Sie auf alle Fälle bearbeiten. Die Lösungen zu den Leitfragen und den Übungsaufgaben finden Sie ebenfalls im letzten Abschnitt dieses Kapitels.

Sollten Sie die Leitfragen noch nicht beantworten können, ist das auch nicht schlimm. Diese Fragen werden Ihnen helfen, die dazugehörigen Abschnitte problemorientiert zu bearbeiten.



#### Leitfrage 2.1

Suchen Sie aus dem Periodensystem das Symbol für Eisen (Fe). Wie viele Protonen, Neutronen und Elektronen besitzt Eisen?



#### Leitfrage 2.2

- Zeichnen Sie die Elektronenhüllen von Aluminium, Magnesium und Bor nach dem Bohr'schen Atommodell. Bitte achten Sie darauf, dass Sie die Größe der Atomhüllen **qualitativ** richtig wiedergeben.
- Ordnen Sie diese Elemente nach ihrer Elektronegativität und begründen Sie diese Reihenfolge.



#### Leitfrage 2.3

Lösen Sie diese Aufgabe, ohne im Periodensystem nachzuschauen. Ein Element stehe in der 4. Hauptgruppe und in der 3. Periode.

- Was sagen diese beiden Angaben über den Aufbau des Atoms aus?
- Skizzieren Sie dieses Atom und geben Sie für die einzelnen Schalen die Anzahl darin der enthaltenen Elektronen an.

### 2.1.2 Atombau

Ein Atom kann man nicht sehen, fühlen oder riechen. Dass es Atome gibt und wie diese aussehen, muss daher indirekt aus Beobachtungen geschlossen werden. Dabei gibt es mehr oder weniger komplexe Vorstellungen (Modelle) vom Atombau. Für unsere Zwecke reicht das Bohr'sche Atommodell aus.

Allen Modellen gemeinsam ist die Unterscheidung des Atoms in zwei Bereiche: den Atomkern und die Elektronenhülle. Ein Atom ist dabei ähnlich wie das

Sonnensystem aufgebaut. Der schwere Atomkern sitzt wie die Sonne in der Mitte des Atoms. Elektronen umkreisen den Kern so wie die Planeten die Sonne umkreisen.

Der Atomkern besteht aus Protonen (positiv geladene Teilchen) und Neutronen (neutrale Teilchen, die etwa genauso schwer sind wie die Protonen und den «Kitt» zwischen den sich abstoßenden Protonen bilden).

Die Elektronenhülle stellt eine negative Ladungswolke dar, die aus den negativ geladenen Elektronen besteht. Die Ladung eines Elektrons ist (mit umgekehrtem Vorzeichen) genauso groß wie die eines Protons. Im neutralen Atom ist daher die Anzahl der Elektronen gleich der der Protonen. Fehlen eines oder mehrere Elektronen oder sind zu viele vorhanden, so ist das Atom positiv bzw. negativ geladen und wird «Ion» genannt.

Die in Bild 2.2 dargestellte schematische Abbildung eines Atoms gibt die wahren Größenverhältnisse zwischen Atomkern und Elektronenhülle allerdings nicht korrekt wieder. Der Durchmesser der Hülle ist um etwa 4 Größenordnungen größer als der Durchmesser des Kerns:

- Atomdurchmesser  $\approx 10^{-10}$  m  $\approx 0,1$  nm
- Kerndurchmesser  $\approx 1/10\ 000 \cdot$  Atomdurchmesser  $\approx 10^{-14}$  m

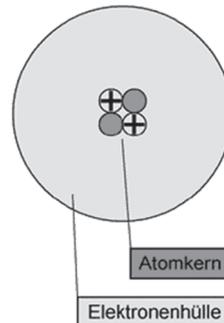


Bild 2.2  
Schematische Darstellung eines Atoms

Hätte der Kern die Größe einer Murmel, erstreckte sich die Elektronenhülle über ein ganzes Fußballfeld!

### 2.1.2.1 Chemische Elemente

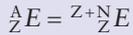
Hinsichtlich der Anzahl von Protonen, Neutronen und Elektronen lassen sich unterschiedliche Atomsorten unterscheiden. Atome eines chemischen Elements haben immer die gleiche Anzahl von Protonen im Kern. Die Zahl der Protonen ist somit ein Charakteristikum für ein bestimmtes Element.

#### Merksatz

Chemische Elemente bestehen aus Atomen gleicher Kernladungszahl  $Z$ .



Dies hat sich auch in der Kennzeichnung chemischer Elemente niedergeschlagen:



- E* Elementabkürzung  
(i.d.R. erster oder erste zwei Buchstaben des lateinischen Elementnamens)
- Z* Kernladungszahl, Ordnungszahl = Zahl der Protonen  
(bei neutralen Atomen = Zahl der Elektronen)
- N* Zahl der Neutronen (meist  $\geq Z$ , außer bei «leichtem» Wasserstoff)
- A* Massenzahl, Nukleonenzahl  
(Nukleonen: Protonen und Neutronen) =  $Z + N$



### Beispiel

*Aluminium*

${}^{27}_{13}\text{Al}$  steht für Aluminium:

Anzahl der Protonen = Anzahl der Elektronen =  $Z = 13$

### Isotope eines Elements

Atome verschiedener Elemente unterscheiden sich in der Zahl der Protonen. Atome desselben Elements können sich bei gleicher Protonenzahl aber auch durch unterschiedliche Neutronenzahlen unterscheiden. Diese Atomarten eines Elements bezeichnet man als Isotope eines Elements.



### Beispiel

*Uran*

${}^{235}_{13}\text{U}$  enthält  $235 - 92 = 143$  Neutronen,  ${}^{238}_{13}\text{U}$  enthält 146 Neutronen.

Beide Atomarten enthalten 92 Protonen.

### Massenzahl A

Die Massenzahl *A* gibt nicht nur Auskunft über die Zahl der Nukleonen im Kern, sondern sie hat noch eine weitere makroskopische Bedeutung. Da die Masse eines Atoms fast vollständig auf den Kern konzentriert ist, lässt sich aus der Zahl der Protonen und Neutronen auf die Masse einer Atomsorte bzw. eines Elements schließen.

Dazu wird folgende Überlegung angestellt: Wenn ein Atom die Massenzahl *A* hat, so haben 1000 Atome die Masse 1000 *A*. Es wird jetzt eine Zahl, die sog. «Avogadro-Konstante» oder «Lohschmidt'sche Zahl», eingeführt:

**Avogadro-Konstante:**  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  Teilchen

Diese Anzahl Teilchen (Atome oder Moleküle) einer Sorte ist 1 Mol dieser Teilchen. Die Massenzahl *A* gibt an, wie viel Gramm ein Mol des entsprechenden Elements wiegt.

**Beispiel***Aluminium* ${}_{13}^{27}\text{Al}$  steht für Aluminium

1 Mol Aluminium wiegt demnach 27 g. Das ist doch etwas Anschauliches!

**2.1.2.2 Die Elektronenhülle**

Die Elektronenhülle bestimmt das chemische Verhalten des Elements, da sich nur die Elektronen an chemischen Reaktionen beteiligen, und zwar nur die Elektronen der äußersten Schale! Verschiedene Isotope eines Elements haben daher das gleiche chemische Verhalten.

Da wir uns für den Zusammenhalt und die chemische Beständigkeit von Werkstoffen interessieren, müssen wir die Atomhülle etwas genauer betrachten. «Betrachten» ist etwas geschönt, denn aus physikalischen Gründen wird man niemals die Struktur der Elektronenhülle direkt sichtbar machen können. Stattdessen entwickelt man theoretische Vorstellungen (Modelle) vom Aufbau der Atome und überprüft deren Brauchbarkeit experimentell.

Es gibt verschiedene Modelle, die die Struktur der Atomhülle beschreiben. Für unsere Zwecke genügt das relativ einfache Bohr'sche Atommodell («Schalenmodell», Bild 2.3), das im Folgenden vereinfacht skizziert ist. Wer es genauer wissen möchte, schaue bitte in Anhang 1 oder in einem der einschlägigen Physikbücher nach.

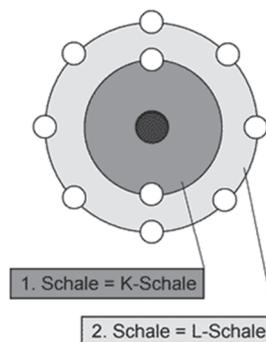


Bild 2.3  
Bohr'sches Atommodell (schematisch)

**Definition****Bohr'sches Atommodell** (s. Bild 2.3).

1. Die Hülle hat eine Struktur (Schalen).
2. Elektronen bewegen sich in diesen Schalen auf «Planetenbahnen» um den Kern.
3. Es sind nur bestimmte Bahnen möglich.
4. Auf jede dieser Bahnen passt nur eine bestimmte Anzahl Elektronen. Diese maximal mögliche Anzahl ist  $2 \cdot n^2$ , wobei  $n$  die Nummer der Schale ist.
5. Die Bahnen werden von innen nach außen aufgefüllt, bis die Anzahl der Elektronen der Kernladungszahl  $Z$  entspricht.

Hat ein Atom eine bestimmte Anzahl von Protonen, so muss die gleiche Anzahl Elektronen in der Hülle untergebracht werden. Geben Sie jetzt gedanklich das erste Elektron hinzu, so wird es vom Kern angezogen und rutscht daher so nahe an diesen heran wie möglich. «So nahe wie möglich» bedeutet: Der Abstand zum Kern ist vom Durchmesser der innersten «erlaubten» Schale vorgegeben.

Nun geben Sie in Gedanken das zweite Elektron hinzu. Auch dieses wird so nah wie möglich zum Kern hingezogen und landet in der gleichen Schale wie das erste Elektron. Jetzt enthält diese erste Schale zwei Elektronen und ist damit aufgefüllt (s. Tabelle 2.1). Rechnerisch findet man das folgendermaßen: Erste Schale heißt  $n = 1$ . Dann ist die maximale Anzahl Elektronen in dieser Schale  $2 \cdot n^2 = 2 \cdot 1 = 2$ .

Kommen jetzt weitere Elektronen hinzu, weil das die Kernladungszahl so verlangt, so muss die nächste Schale angebrochen werden. Das wäre dann die zweite Schale, die  $2 \cdot 2^2 = 8$  Elektronen aufnehmen kann. Tabelle 2.1 fasst zusammen, wie die Schalen weiter aufgefüllt würden.

Tabelle 2.1 Bohr'sches Atommodell, Zahl der Elektronen pro Schale

1. Schale	K	2	Elektronen
2. Schale	L	8	Elektronen
3. Schale	M	18	Elektronen
4. Schale	N	32	Elektronen
...	...	...	
$n$ . Schale	...	$(2n^2)$	Elektronen

Dieses sei am Beispiel des Si-Atoms einmal vorgeführt. Si hat die Ordnungszahl 14, also 14 Protonen und Elektronen. Zwei Elektronen passen in die erste Schale, bleiben 12. Davon gehen 8 in die zweite Schale, bleiben 4. Die letzten 4 Elektronen gehen in die dritte Schale. Damit ist das Atom vollständig.



### Beispiel

#### *Siliziumatom*

Der Elektronik-Werkstoff Silizium ( ${}_{13}^{28}\text{Si}$ ) hat 14 Elektronen. Diese verteilen sich wie folgt:

1. Schale: 2 Elektronen
2. Schale: 8 Elektronen
3. Schale: 4 Elektronen

Für die chemischen Eigenschaften eines Atoms bzw. Elements ist nur die äußere Schale, die sogenannte Valenzschale, zuständig. Nur die Elektronen dieser äußeren Schale, die sogenannten Valenzelektronen, sind an chemischen Bindungen beteiligt.

Silizium hat daher vier Elektronen, die sich an chemischen Bindungen beteiligen können. Das Gleiche gilt für Kohlenstoff, der sich daher in vielerlei Hinsicht ähnlich wie Silizium verhält.

### 2.1.3 Periodensystem der Elemente

Man kennt heute mehr als 100 chemische Elemente. Elemente bis zur Kernladungszahl (Ordnungszahl) 92 (Uran) kommen natürlich vor. Elemente mit einer höheren Ordnungszahl können nur künstlich erzeugt werden.

Die Elemente werden in einem Matrixsystem angeordnet, das man als **Periodensystem der Elemente (PSE)** bezeichnet. Die Sortierung der Elemente erfolgt dabei nach folgendem Prinzip:

#### Definition

##### Periodensystem der Elemente – Anordnungsprinzip

- Die Elemente stehen in waagerechten Reihen, die als Perioden bezeichnet werden. Die Reihen eins bis sieben heißen 1. bis 7. Periode.
- Die Periode gibt die Anzahl der Schalen eines Elements an.
- Elemente mit gleicher Schalenanzahl werden in eine Reihe geschrieben. Dabei nimmt die Anzahl der Valenzelektronen von links nach rechts zu.
- Die senkrechten Reihen der Elemente nennt man Gruppen: Sie unterteilen sich in Haupt- und Nebengruppen.
- Die Gruppe gibt die Anzahl der Valenzelektronen (Elektronen auf der äußeren Schale) eines Elements an.
- Alle Elemente mit gleicher Anzahl Valenzelektronen gehören zu einer Gruppe und werden untereinander geschrieben. Dabei nimmt die Anzahl der Schalen von oben nach unten zu.

Die Kurzvariante des PSE (ohne Nebengruppen) sieht wie in Bild 2.4 dargestellt aus.

		Anzahl der Valenzelektronen →								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
Anzahl der Schalen ↓	Gruppe									
	Periode									
	1	<sup>1</sup> <sub>1</sub> H								<sup>4</sup> <sub>2</sub> He
	2	<sup>6,9</sup> <sub>3</sub> Li	<sup>9</sup> <sub>4</sub> Be	<sup>10,8</sup> <sub>5</sub> B	<sup>12</sup> <sub>6</sub> C	<sup>14</sup> <sub>7</sub> N	<sup>16</sup> <sub>8</sub> O	<sup>19</sup> <sub>9</sub> F	<sup>20,2</sup> <sub>10</sub> Ne	
	3	<sup>23</sup> <sub>11</sub> Na	<sup>24,3</sup> <sub>12</sub> Mg	<sup>27</sup> <sub>13</sub> Al	<sup>28,1</sup> <sub>14</sub> Si	<sup>31</sup> <sub>15</sub> P	<sup>31,2</sup> <sub>16</sub> S	<sup>35,5</sup> <sub>17</sub> Cl	<sup>40</sup> <sub>18</sub> Ar	
	4	<sup>39,1</sup> <sub>19</sub> K	<sup>40,1</sup> <sub>20</sub> Ca	<sup>69,7</sup> <sub>31</sub> Ga	<sup>72,6</sup> <sub>32</sub> Ge	<sup>74,9</sup> <sub>33</sub> As	<sup>79</sup> <sub>34</sub> Se	<sup>79,9</sup> <sub>35</sub> Br	<sup>83,8</sup> <sub>36</sub> Kr	
	5	<sup>85,5</sup> <sub>37</sub> Rb	<sup>187,6</sup> <sub>38</sub> Sr	<sup>114,8</sup> <sub>49</sub> In	<sup>118,7</sup> <sub>50</sub> Sn	<sup>121,8</sup> <sub>51</sub> Sb	<sup>127,6</sup> <sub>52</sub> Te	<sup>126,9</sup> <sub>53</sub> I	<sup>131,3</sup> <sub>54</sub> Xe	
	6	<sup>132,9</sup> <sub>55</sub> Cs	<sup>137,3</sup> <sub>56</sub> Ba	<sup>204,4</sup> <sub>81</sub> Tl	<sup>207,2</sup> <sub>82</sub> Pb	<sup>209</sup> <sub>83</sub> Bi	<sup>204</sup> <sub>84</sub> Po	<sup>210</sup> <sub>85</sub> At	<sup>222</sup> <sub>86</sub> Rn	
7	<sup>223</sup> <sub>87</sub> Fr	<sup>226</sup> <sub>88</sub> Ra								

Bild 2.4 Periodensystem der Elemente (Kurzversion; nur Hauptgruppen)

Das komplette PSE (inklusive Nebengruppen) finden Sie im Anhang. Und so können Sie das Periodensystem lesen:


**Beispiel** (s.a. Bild 2.5):

1. Kohlenstoff [C] steht in der IV. Hauptgruppe und in der 2. Periode. Kohlenstoff hat demnach zwei Elektronenschalen. Und in der wichtigen äußeren Schale befinden sich 4 Valenzelektronen.
2. Stickstoff [N] steht in der gleichen Periode wie Kohlenstoff, hat also ebenfalls zwei Schalen (wird also ähnlich groß sein wie Kohlenstoff). Stickstoff (V. Hauptgruppe) hat jedoch fünf Elektronen in der äußeren Schale.
3. Silizium (IV. Hauptgruppe.) hat zwar wie C 4 Elektronen in der äußeren Schale. Diese äußere Schale ist jedoch die dritte. Si ist daher größer als Kohlenstoff.

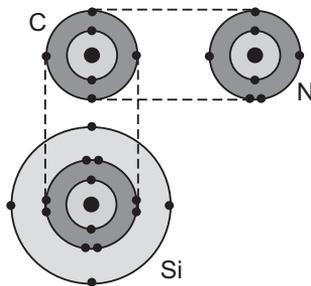


Bild 2.5  
Elektronenkonfiguration von Kohlenstoff (C),  
Stickstoff (N) und Silizium (Si)

Die Elemente der VIII. Hauptgruppe sind allesamt Edelgase. Die Edelgase sind äußerst reaktionsträge (chemisch inert). Sie zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Valenzschalen vollständig mit Elektronen besetzt sind. Den Zustand, dass die Valenzschale vollständig mit Elektronen besetzt ist, bezeichnet man daher auch als Edelgaskonfiguration.

Atome, deren Valenzschale eine Edelgaskonfiguration aufweist, befinden sich in einem energetisch sehr günstigen Zustand, d.h., das System hat die niedrigste mögliche Energie.

## 2.2 Bindungen

### 2.2.1 Leitfragen

Die folgenden Fragen sollen Sie durch den Abschnitt 2.2.1 leiten. Suchen Sie bei der Bearbeitung des Abschnitts nach Lösungshinweisen. Das wird Ihnen bei der problemorientierten Bearbeitung des Abschnitts helfen. Wenn Sie die Fragen schon beantworten können, können Sie Abschnitt 2.2.1 auch zügiger bearbeiten oder überspringen. Die Lösungen finden Sie mit weiteren Aufgaben und den dazugehörigen Lösungen im letzten Abschnitt dieses Kapitels.


**Leitfrage 2.4**

Glas besteht aus  $\text{SiO}_2$ .  $\Delta EN$  ist ca. 1,7 – d.h., Glas ist gerade auf der Grenze von kovalenter zu ionischer Bindung.

- a) Wenn Sie den Sauerstoff (O) durch Stickstoff (N) ersetzen, erhalten Sie die Keramik  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Welcher Art ist diese Bindung? Begründen Sie mit Hilfe des PSE!

- b) Ausgehend vom Glas ersetzen Sie Si durch Mg und erhalten das Korrosionsprodukt MgO. Welcher Art ist diese Bindung? Begründen Sie mit Hilfe des PSE!

### Leitfrage 2.5



- a) Suchen Sie in einem Tabellenwerk die Schmelztemperaturen von Nickel und von Aluminium.
- b) Was sagen die unterschiedlichen Schmelztemperaturen über die Potenzialkurven dieser Werkstoffe aus?
- c) Welches der Elemente wird wohl einen höheren E-Modul haben? Begründen Sie Ihre Antwort kurz!

## 2.2.2 Übersicht über die Bindungsarten

Der Zusammenhalt eines Festkörpers sowie seine Eigenschaften werden wesentlich durch die Atome, aus denen er aufgebaut ist, und durch die Art des Zusammenhalts der Atome bestimmt.

Atome eines Elements können sich mit Atomen des gleichen oder auch mit Atomen anderer Elemente verbinden. Für den Zusammenhalt von Atomen ist hierbei eine chemische Bindung erforderlich, von der es drei Grundtypen gibt.

### Merksatz



#### Grundtypen der chemischen Bindung

- Ionenbindung
- Kovalente Bindung (= Atombindung oder Elektronenpaarbindung)
- Metallische Bindung

Die Bindungen kommen durch den Austausch bzw. die gemeinsame Nutzung von Elektronen zustande. Man bezeichnet diese Formen der Bindung daher auch als **Austauschbindungen**.

Ob Atome die eine oder andere Bindung eingehen, hängt mit der Elektronenkonfiguration der Valenzelektronen zusammen. Erreichen die Atome durch die Bindung in ihrer äußeren Schale eine Edelgaskonfiguration, so ist die Anordnung energetisch günstig und damit stabil. An einer Bindung beteiligte Atome «versuchen» daher, sich mit ihrem Bindungspartner so zu arrangieren, dass möglichst eine Edelgaskonfiguration erreicht wird.

Atome bestimmter Elemente haben dabei eine starke Tendenz, Elektronen des Bindungspartners an sich heranzuziehen. Welche Elemente besonders dazu neigen, lässt sich aus dem Wert der Elektronegativität für ein bestimmtes Element ablesen.

### Definition



Die **Elektronegativität (EN)** ist ein Maß für die Anziehungskraft eines Atoms auf seine Bindungselektronen. Je höher der Wert für die EN eines Elements ist, desto stärker ist die Fähigkeit ausgeprägt, Bindungselektronen anzuziehen. Eine Tabelle der Elektronegativitäten finden Sie im Anhang.

Ordnet man die Elemente entsprechend ihrer Elektronegativität an, so zeigt sich eine gewisse Übereinstimmung mit ihrer Stellung im Periodensystem.

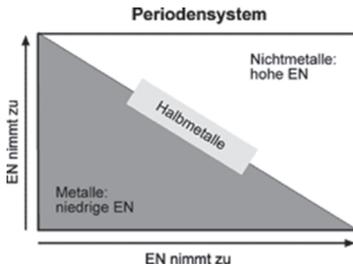


Bild 2.6  
Elektronegativität der Elemente

Im Periodensystem nimmt die *EN* tendenziell von links nach rechts zu und von oben nach unten ab (Bild 2.6). Links unten im PSE befinden sich Elemente mit niedriger *EN*. Dabei handelt es sich durchweg um Metalle. Rechts oben befinden sich die Nichtmetalle (Elemente mit hoher *EN*). Entlang der Diagonalen von links oben nach rechts unten befinden sich die Halbmetalle. Der «Metallcharakter» nimmt in einer Periode von links nach rechts ab und in einer Gruppe von oben nach unten zu.

Bild 2.7 verdeutlicht anhand der Elemente Kohlenstoff, Stickstoff und Silizium, wie sich auch aus dem Vergleich der Atomstrukturen von Elementen auf deren Elektronegativität schließen lässt.

Stickstoff hält die Bindungselektronen fester als Kohlenstoff, da sich beim Stickstoff die Valenzelektronen in einem elektrischen Feld von 5 Protonen bewegen (beim Kohlenstoff sind es nur 4 Protonen).

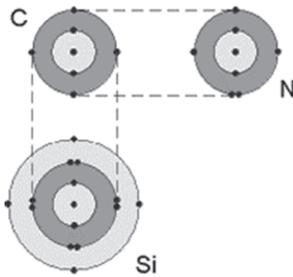


Bild 2.7  
Elektronenkonfiguration von Kohlenstoff (C),  
Stickstoff (N) und Silizium (Si)

Kohlenstoff hält Valenzelektronen fester als Silizium, da dessen Valenzelektronen weiter vom Kern entfernt sind als bei Kohlenstoff. Daraus ergibt sich für die Elektronegativität:

$$EN (\text{Stickstoff}) > EN (\text{Kohlenstoff}) > EN (\text{Silizium})$$

### 2.2.3 Ionenbindung

Ionenbindungen entstehen bei sehr unterschiedlicher Elektronegativität ( $\Delta EN > 1,7$ ) der Bindungspartner. Das Element mit niedrigerer *EN* gibt seine Valenzelektronen an das Element mit der höheren *EN* ab. Bild 2.8 zeigt die Ausbildung einer Ionen-

bindung zwischen Natrium (Na;  $EN = 0,9$ ) und Chlor (Cl;  $EN = 3,0$ ). Das Natrium-Atom gibt ein Valenzelektron an das Chlor-Atom ab.

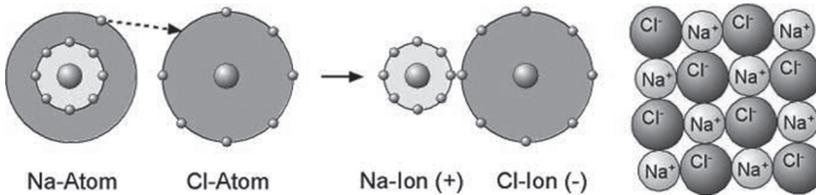
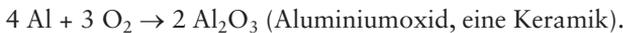


Bild 2.8 Ausbildung einer Ionenbindung

Generell gilt, dass Atome mit einer geringen Elektronegativität (Metalle), wie z.B. Aluminium mit drei Elektronen in der äußeren Schale, eine Tendenz haben die Valenzelektronen abzugeben. Dadurch entstehen positiv geladene Teilchen, die **Kationen** (z.B.  $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3 e^-$ ), deren jetzige äußere Schale eine Edelgaskonfiguration hat. Atome, denen an der Edelgaskonfiguration der Valenzelektronen nur wenige Elektronen fehlen, wie z.B. dem Sauerstoff, haben eine Tendenz, Elektronen aufzunehmen und dabei negativ geladene Teilchen, die **Anionen** (z.B.  $\text{O} + 2 e^- \rightarrow \text{O}^{2-}$ ), zu bilden. Damit sowohl Aluminium als auch Sauerstoff die energetisch günstige «Edelgaskonfiguration» erreichen, werden also 2 Al-Atome (6 Elektronen zur Abgabe) und 3 O-Atome (können insgesamt 6 Elektronen aufnehmen) benötigt:



Die Elektronegativitäten betragen in diesem Fall  $EN_{\text{Al}} = 1,5$  für das Aluminium und  $EN_{\text{O}} = 3,5$  für den Sauerstoff; der Unterschied beträgt demnach  $\Delta EN = 2,0$ .

### Merksatz

#### Ionenbindung

Ionenbindungen entstehen **bei sehr unterschiedlicher Elektronegativität ( $\Delta EN > 1,7$  nach PAULING)** der Bindungspartner. Das Element mit niedrigerer  $EN$  gibt seine Valenzelektronen an das andere Element ab.

Durch diesen Elektronenaustausch kommt es zur Ionenbildung. Diese Ionen ziehen sich aufgrund ihrer entgegengesetzten Ladung an.

## 2.2.4 Kovalente Bindung

### Merksatz

Die **kovalente Bindung** ist durch die gemeinsame Nutzung von Valenzelektronen der an der Bindung beteiligten Atome charakterisiert. Kovalente Bindungen können entstehen, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die Bindungspartner müssen eine mehr oder weniger ähnliche Elektronegativität haben ( $\Delta EN < 1,7$ ).
2. Beide Bindungspartner müssen eine Elektronegativität von ca.  $EN > \text{ca. } 1,5$  aufweisen.

Kovalente Bindungen können entstehen, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die Bindungspartner müssen eine ähnliche Elektronegativität aufweisen ( $\Delta EN < 1,7$ ).
2. Beide Bindungspartner müssen eine Elektronegativität von ca.  $EN > 1,5$  aufweisen. (Bitte nehmen Sie hier das «ca.» wichtiger als die 1,5. Es handelt sich wirklich nur um eine sehr unscharfe Bedingung.)

Die kovalente Bindung ist durch die gemeinsame Nutzung von Valenzelektronen der an der Bindung beteiligten Atome charakterisiert (Bild 2.9). Je nach Elektronegativität der Bindungspartner kann die kovalente Bindung hierbei unipolar bzw. polar sein.

**Unpolare kovalente Bindung:** Beide Partner haben die gleiche Elektronegativität (exakt nur bei gleichartigen Bindungspartnern möglich). Unpolare kovalente Bindungen finden sich z.B. in Si-Kristallen, C-C-Bindungen (Kunststoffe, Graphit, Diamant).

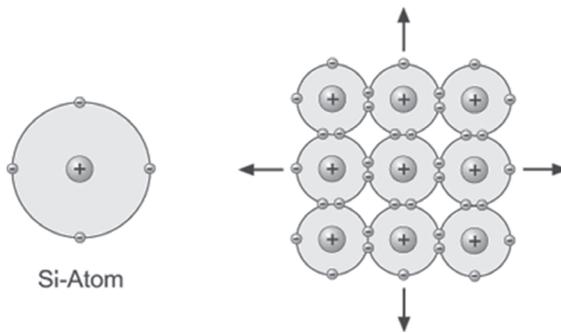


Bild 2.9 Kovalente Bindung zwischen Silizium-Atomen (schematisch)

**Polare kovalente Bindung:** Die Bindungspartner haben eine unterschiedliche Elektronegativität. Dadurch werden die Bindungselektronen stärker zu dem Atom mit höherer Elektronegativität hingezogen. Es kommt zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Ladung und zur Ausbildung eines Dipolmoments (etwa wie Magnet mit Nord- und Südpol). Die polare Bindung nimmt eine Zwischenstufe zwischen ionischer und unipolarer kovalenter Bindung ein. Polare kovalente Bindungen finden sich z.B. in SiC (Keramik), GaAs (Halbleiter) und in vielen Kunststoffen (C=O-Bindungen).

## 2.2.5 Metallische Bindung

Metallische Bindungen können entstehen, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die Bindungspartner müssen eine mehr oder weniger ähnliche Elektronegativität aufweisen ( $\Delta EN < 1,7$ ).
2. Beide Bindungspartner haben eine relativ geringe Elektronegativität von ca.  $EN < 1,5$  (grobe Daumenregel).

Ebenso wie bei der kovalenten Bindung, liegt auch bei der metallischen Bindung eine gemeinsame Nutzung von Valenzelektronen vor. Im Gegensatz zu anderen Bindungsarten sind die Valenzelektronen allerdings nicht an ein bestimmtes Atom gebunden, sondern delokalisiert. Die Atome ordnen sich bei der metallischen Bindung in Gittern an. Innerhalb dieser Gitter sind die Valenzelektronen so weit delokalisiert, dass sie sich zwischen den räumlich fixierten, positiv geladenen Atomrümpfen frei bewegen können (s. Bild 2.10).

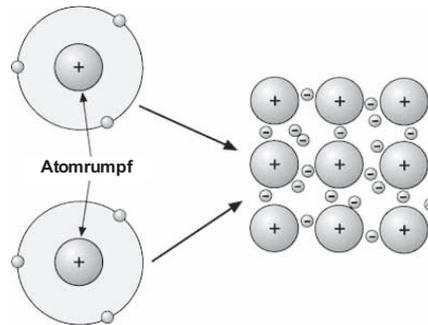


Bild 2.10  
Metallische Bindung  
(positive Atomrümpfe im negativ  
geladenen «Elektronengas»)

Die Valenzelektronen stellen eine Art dreidimensionales «Elektronengas» dar, das sich quasi frei im Festkörper bewegen kann. Die frei beweglichen Elektronen sind auch der Grund für das besondere elektrische Leitvermögen der Metalle.

Die Bindungsenergie metallischer Bindungen ist geringer als bei kovalenter oder ionischer Bindung. Daraus resultieren auch die höhere Korrosionsanfälligkeit der Metalle sowie eine geringere Härte als z.B. bei Keramiken. Die Bindungen können leichter als bei kovalenter oder ionischer Bindung von einem Partner zum nächsten umklappen. Dies erklärt die gute plastische Verformbarkeit von Metallen.

## Merksatz



### Metallische Bindung

- ❑ Die metallische Bindung ist durch die gemeinsame Nutzung von Valenzelektronen der an der Bindung beteiligten Atome charakterisiert. Im Gegensatz zu anderen Bindungsarten sind die Valenzelektronen allerdings nicht an ein bestimmtes Atom gebunden, sondern delokalisiert (Elektronengas).
- ❑ Die Bindungsenergie ist geringer als bei kovalenter oder ionischer Bindung (Korrosionsanfälligkeit der Metalle, geringere Härte als Keramik).
- ❑ Bindungen können leichter als bei kovalenter oder ionischer Bindung von einem Partner zum nächsten umklappen (plastische Verformbarkeit).

Metallische Bindungen können entstehen, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die Bindungspartner müssen eine mehr oder weniger ähnliche Elektronegativität aufweisen ( $\Delta EN < 1,7$ ).
2. Beide Bindungspartner müssen eine Elektronegativität von ca.  $EN < \text{ca. } 1,5$  aufweisen.

## 2.2.6 Sekundäre Bindungen

Sekundäre Bindungen sind Bindungen, die auf **zwischenmolekularen Wechselwirkungen** beruhen. Im Gegensatz zu den chemischen primären Bindungen (Ionenbindung, kovalente und metallische Bindung) findet sich bei den sekundären Bindungen weder die gemeinsame Nutzung noch der Austausch von Valenzelektronen zwischen den Bindungspartnern. Zudem sind die auftretenden Bindungsenergien erheblich geringer. Die sekundären Bindungen sind daher thermisch und chemisch recht instabil.

Man unterscheidet verschiedene Arten sekundärer Bindungen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

### Wasserstoffbrücken-Bindung

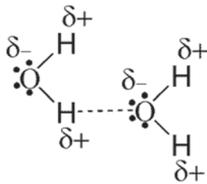


Bild 2.11  
Wasserstoffbrücken-Bindung  
zwischen Wassermolekülen

Wasserstoffbrücken können sich zwischen einem Wasserstoff (H)-Atom und zwei anderen gleichen oder verschiedenen Atomen ausbilden, sofern diese Atome klein und stark elektronegativer (z.B. O, N) sind. Die beteiligten Atome können sich entweder in demselben Molekül (intramolekulare H-Brücke) oder in verschiedenen Molekülen (intermolekulare H-Brücke) befinden.

Bild 2.11 zeigt die Ausbildung einer H-Brücke zwischen zwei Wassermolekülen. Sauerstoff ist wesentlich elektronegativer als Wasserstoff. Dadurch wird das Wassermolekül stark polar. Zudem hat der Sauerstoff zwei freie Elektronenpaare. Nähert sich jetzt ein zweites Wassermolekül mit seiner Sauerstoffseite, so «möchte» das positive H-Atom an den freien Elektronen des benachbarten Sauerstoffs partizipieren. Dadurch kommt es zu einem gewissen Zusammenhalt. Diese Art von Bindung spielt auch in Kunststoffen eine Rolle (z.B. bei Polyamid = PA).

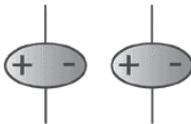


Bild 2.12  
Dipol-Dipol-Wechselwirkung

### Dipol-Dipol-Wechselwirkungen

Dipol-Dipol-Wechselwirkungen treten zwischen Molekülen auf, die eine asymmetrische Ladungsverteilung bzw. ein Dipolmoment aufweisen. Solche polaren Moleküle ziehen sich wie Stabmagneten gegenseitig an (Bild 2.12).

### Dipol vs. induzierter Dipol

Diese Art von zwischenmolekularer Wechselwirkung beruht auf demselben Prinzip wie die Dipol-Dipol-Wechselwirkung. Allerdings sind an der Wechselwirkung nicht

ausschließlich polare Moleküle beteiligt. Vielmehr kommt es hier zu einer Wechselwirkung zwischen einem polaren und einem unpolaren Molekül. Das polare Molekül induziert eine schwache Polarisierung des eigentlich unpolaren Moleküls.

### Dispersionskräfte (Van-der-Waals-Bindung)

Elektronen bewegen sich «statistisch» im Atom. Bei Momentaufnahmen würden ungleichmäßige Elektronenverteilungen festgestellt werden. Diese Momente sind zu kurz, um mit Messgeräten erfasst zu werden, können aber von benachbarten Atomen wahrgenommen werden («fluktuierende Dipole»). Die Atome schwingen dann teilweise in Phase und es werden schwache Dipolkräfte wirksam (z.B. Polyethylen).

### Merksatz



#### Sekundäre Bindungen:

Sekundäre Bindungen sind Bindungen, die auf zwischenmolekularen Wechselwirkungen beruhen. Die auftretenden Bindungsenergien sind erheblich geringer als bei chemischen Bindungen. Die sekundären Bindungen sind thermisch und chemisch recht instabil.

Man unterscheidet verschiedene Arten sekundärer Bindungen:

1. Wasserstoffbrückenbindungen,
2. Dipol-Dipol-Wechselwirkungen,
3. Dipol vs. Induzierter Dipol,
4. Dispersionskräfte (Van-der-Waals-Bindungen).

Sekundäre Bindungen spielen insbesondere bei Kunststoffen eine wichtige Rolle. Kunststoffe bestehen aus Kettenmolekülen, die in sich kovalent gebunden sind, untereinander jedoch nur über sekundäre Bindungen zusammenhalten. Kunststoffe sind daher chemisch sehr beständig, schmelzen aber schon bei geringen Temperaturen (Abgleiten der Ketten aneinander).

Bild 2.13 zeigt die schematische Anordnung der verschiedenen Bindungstypen nach absteigenden Bindungskräften.

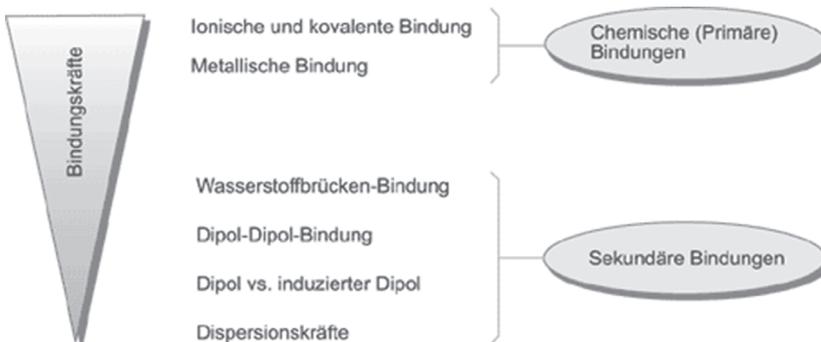


Bild 2.13 Anordnung chemischer und sekundärer Bindungstypen nach Bindungskräften

## 2.2.7 Bindungspotenzial und Bindungskräfte

Zwischen den Bindungspartnern in einem Molekül bzw. Festkörper wirken sowohl Anziehungs- als auch Abstoßungskräfte: Sind die Atome sehr weit voneinander entfernt, so «merken» sie nichts voneinander. Kommen die Atome einander näher, so beginnen Anziehungskräfte zwischen ihnen zu wirken, die die Atome immer näher zueinander hin ziehen. Dabei sinkt die Energie des Systems (umgekehrt muss Energie aufgewendet werden, um die Atome voneinander zu entfernen). Wird der Abstand der Atome immer weiter verringert, so berühren sich irgendwann die Atomrümpfe. Versucht man die Atome jetzt noch weiter zusammenzudrücken, so muss man sehr viel Kraft aufwenden, also wieder Energie aufbringen.

In einem bestimmten Abstand heben sich Abstoßungs- und Anziehungskräfte gerade gegenseitig auf. Die Gesamtkraft ist 0 und die Energie ist minimal. Sowohl zur Abstandsverkleinerung, wie auch zur Abstandsvergrößerung muss Arbeit verrichtet, also die Energie des Systems erhöht werden.

Dieses sei am Beispiel der ionischen Bindung genauer erläutert. Das Coulomb-Gesetz beschreibt hier die elektrostatische Anziehung:

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{Al} \cdot q_O}{r^2}$$

$F_C$  elektrostatische Anziehungskraft (negativ bei ungleichnamigen Ladungen)

$q_{Al}$  Ladung des Al-Ions (+3)

$q_O$  Ladung des Sauerstoffions (-2)

$r$  Abstand der Ionen (Mittelpunkt zu Mittelpunkt)

$\epsilon_0$  Dielektrizitätskonstante des Vakuums (Naturkonstante)

Aus der Kraft kann die potenzielle Energie  $W_C$  berechnet werden. Dabei verwendet man das Gesetz «Arbeit ist Kraft mal Weg», oder genauer: Die potenzielle Energie ist gleich dem Wegintegral über die Kraft. Entsprechend erhält man dann wieder die Kraft als die Ableitung der potenziellen Energie nach dem Ort:

$$F_C = -\frac{\partial W_C}{\partial r} \Leftrightarrow W_C = -\int F_C dr$$

Das negative Vorzeichen rührt daher, dass man einer Anziehungskraft entgegenwirkt, um die Energie des Systems zu erhöhen. Wenden wir das auf unser Coulomb-Gesetz der elektrostatischen Anziehung an, so bekommen wir die Coulomb-Energie  $W_C$ , d.h. die potenzielle Energie zweier Ladungen, die zueinander den Abstand  $r$  haben:

$$W_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{Al} \cdot q_O}{r} \quad (\text{negativ bei ungleichnamigen Ladungen})$$

Kommen die Atome einander zu nahe (ca. zweifacher Atomradius), beginnt die Abstoßung zu wirken. Das Abstoßungspotenzial gehorcht einem Potenzgesetz (hier willkürlich:  $r^{-12}$ ):

$$F_{ab} = 12C \cdot \left(\frac{1}{r}\right)^{13}, \quad W_{ab} = -C \cdot \left(\frac{1}{r}\right)^{12}$$

$F_{ab}$  Abstoßungskraft; positiv, da Abstoßung  
 $W_{ab}$  dazugehörige potenzielle Energie  
 $C$  eine experimentell zu ermittelnde Konstante

Die Gesamtenergie  $W_{\Sigma}$  des Systems ist dann die Summe von Abstoßungs- ( $W_{ab}$ ) und Anziehungspotenzial  $W_C$ :

$$W_{\Sigma} = W_C + W_{ab}$$

Dieser Zusammenhang ist in Bild 2.14 dargestellt. Bild 2.14a zeigt den Verlauf der einzelnen Potentiale sowie der Summenkurve. Die Summenkurve durchläuft ein Minimum. Dieses Minimum entspricht dem Gleichgewichtsabstand (Anziehungskraft = Abstoßungskraft) der Atome.

Die Bindungsenergie ( $\approx$  Tiefe des «Potenzialtopfes») ist ein Maß für die **chemische und thermische Stabilität** der Bindung. Kovalente und ionische Bindungen haben einen sehr viel tieferen Potenzialtopf als metallische Bindungen. Daher sind Keramiken sehr korrosionsbeständig und ertragen sehr hohe Einsatztemperaturen.

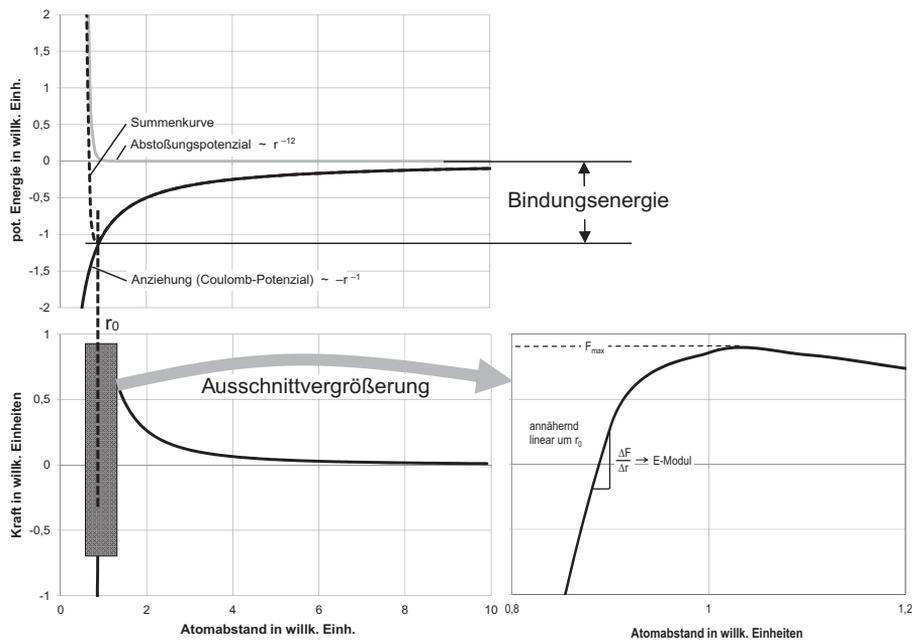


Bild 2.14 Ableitung der theoretischen Festigkeit und des theoretischen E-Moduls aus dem Bindungspotenzial

Leitet man die Summenkurve nach  $r$  ab, so ergibt sich die Kraftkurve ( $F_{\Sigma}$ ), die in Bild 2.14b dargestellt ist:

$$F_{\Sigma} = \frac{\partial W_{\Sigma}}{\partial r}$$

Aus der Kraftkurve lassen sich wichtige Kennwerte eines Werkstoffs ablesen. Die Maximalkraft  $F_{max}$  (muss man natürlich noch mit der Anzahl der Bindungen pro Querschnitt multiplizieren) entspricht der «**theoretischen Festigkeit**» eines Werkstoffs. Aus der Steigung der Kraftkurve im Nullpunkt kann der **theoretische E-Modul** hergeleitet werden (Widerstand gegen elastische Verformung = reversible Auslenkung der Atome aus der Gleichgewichtslage):

$$E \propto \frac{dF_{\Sigma}}{dr} \propto \frac{d^2W_{\Sigma}}{dr^2}$$

Die Steigung ist dabei umso steiler, je tiefer der Potenzialtopf ist. Daher haben Keramiken i.d.R. auch einen höheren E-Modul als Metalle.

## 2.3 Gitterstrukturen

Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften eines Werkstoffs werden nicht nur durch die Art der Bindungen zwischen den Atomen, sondern auch durch die Anordnung der Atome im Festkörper bestimmt. Dabei spielen sowohl die Art der Packung der Atome als auch deren Packungsdichte eine wichtige Rolle. Mit diesem Thema befassen sich die folgenden Abschnitte.

### 2.3.1 Leitfragen

Diese Fragen sollen Sie durch den Abschnitt 2.3 leiten. Suchen Sie während der Bearbeitung nach Lösungshinweisen. Sollten Sie diese Fragen bereits beantworten können, dürfen Sie den Abschnitt zügiger bearbeiten. Bevor Sie ihn überschlagen, sollten Sie jedoch auf alle Fälle die anderen Übungsaufgaben zum Thema Gitterbau am Ende dieses Kapitels bearbeiten, denn das Kapitel Gitterbau hat eine sehr zentrale Bedeutung.

Lösungen zu den Leitfragen finden Sie mit weiteren Fragen und Antworten am Ende dieses Kapitels.



#### Leitfrage 2.6

In Abschnitt 2.3.3 werden Sie sehen, wie man die Parameter des krz-Gitters berechnet. Die entsprechenden Parameter für den kfz-Kristall werden ohne Rechnung angegeben mit: