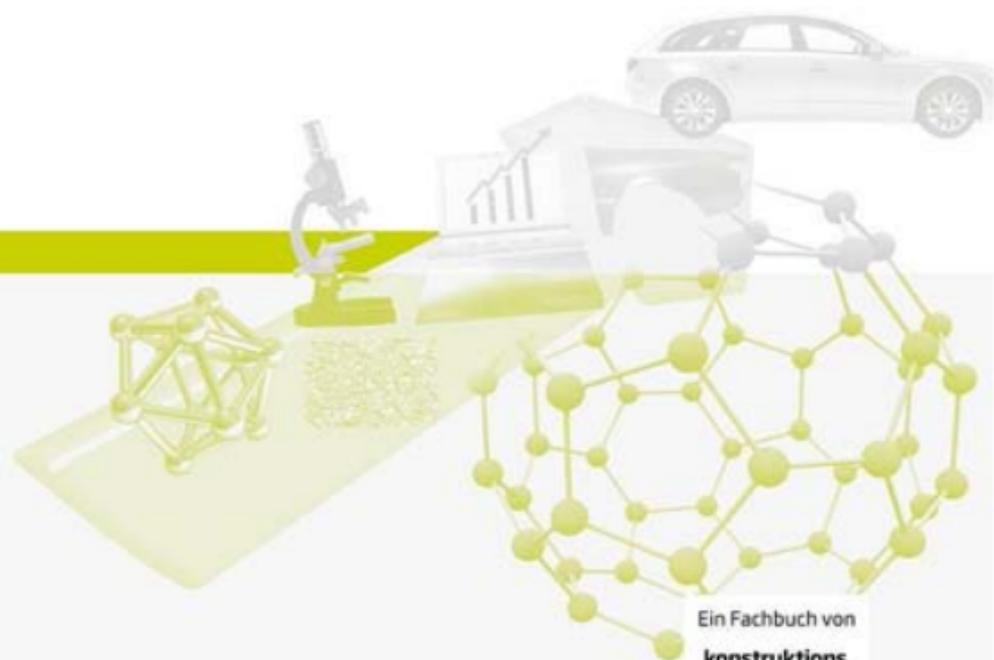


OLAF JACOBS

# Werkstoffkunde



Ein Fachbuch von

**konstruktions  
praxis**



Vogel Business Media

Olaf Jacobs

Werkstoffkunde

Professor Dr.-Ing. Olaf Jacobs

# **Werkstoffkunde**

**3., überarbeitete und erweiterte Auflage**

Vogel Business Media

**Prof. Dr.-Ing. OLAF JACOBS**

wurde 1957 geboren. Nach Abschluss des Gymnasiums studierte er an der Universität Hamburg Physik. Anschließend arbeitete er für ca. 3 ½ Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Hamburg-Harburg im Arbeitsbereich Kunststoffe Polymer-Verbundwerkstoffe. Er promovierte dort auf den Gebieten Reibung und Verschleiß sowie Ermüdung von polymeren Hochleistungsverbundwerkstoffen zum Dr.-Ing. Von 1990–1995 war er bei Airbus in Bremen mit der Entwicklung von Bauweisen auf der Basis verschiedener Werkstoffe befasst. Seit 1995 ist er Professor für Werkstoffkunde an der Fachhochschule Lübeck. Seine Spezialgebiete sind Kunststoffe und Verbundwerkstoffe, Reibung und Verschleiß sowie Methoden der zielorientierten Werkstoffauswahl. Er entwickelte ein Online-Lehrmodul für Werkstoffkunde.

Bei der Zusammenstellung der Texte und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Der Autor übernimmt für irgendwelche Irrtümer, Auslassungen oder fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung.

ISBN 978-3-8343-3350-6

3. Auflage. 2016

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hier von sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2009 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

## 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.

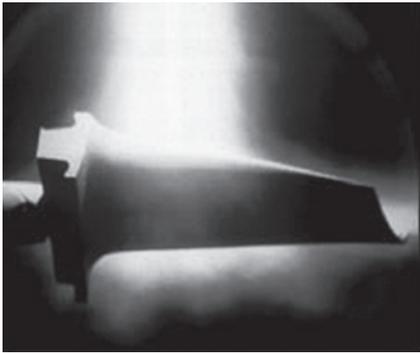


Bild 1.2  
Beschichtung einer Turbinenschaufel mit einer keramischen Schicht im thermischen Spritzverfahren (mit freundlicher Genehmigung der Sulzer Metco AG)

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)

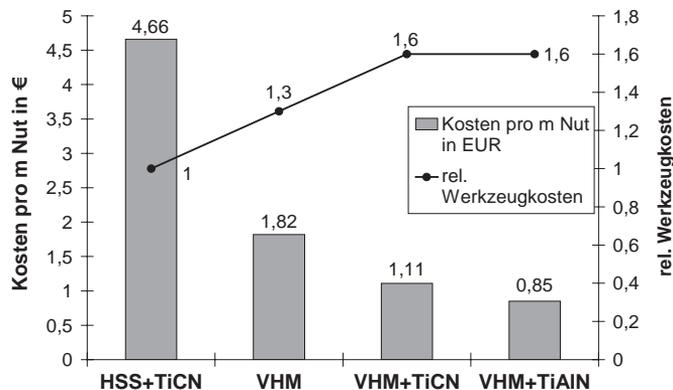


Bild 1.6 Kostenvergleich von Bohrfräsern unterschiedlicher Qualität nach Techno-Span® Maschinen und Werkzeuge, Willich

### 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.

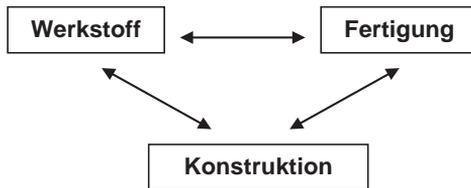


Bild 1.7 Wechselwirkungen zwischen Werkstoff, Konstruktion und Fertigung

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 Bearbeitungautomaten). 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).