



dandelion.com

© 2008 AGI-Information Management Consultants
May be used for personal purposes only or by
libraries associated to dandelion.com network.

**Joachim Rösler, Harald Harders,
Martin Bäker**

Mechanisches Verhalten der Werkstoffe

2., durchgesehene und erweiterte Auflage

Mit 318 Abbildungen, 31 Tabellen und
34 Aufgaben und Lösungen



Teubner

Inhaltsverzeichnis

1	Aufbau der Werkstoffe	1
1.1	Atomaufbau und chemische Bindung	1
1.2	Metalle	5
1.2.1	Metallische Bindung	5
1.2.2	Kristallstrukturen	7
1.2.3	Polykristalline Metalle	14
1.3	Keramiken	16
1.3.1	Kovalente Bindung	16
1.3.2	Ionenbindung	18
1.3.3	Dipolbindung	19
1.3.4	Van-dér-Waals-Bindung	20
1.3.5	Wasserstoffbrückenbindung	20
1.3.6	Kristallstruktur von Keramiken	21
1.3.7	Amorphe Keramiken	22
1.4	Polymere	24
1.4.1	Chemischer Aufbau der Polymere	24
1.4.2	Struktur der Polymere	28
2	Elastisches Verhalten	31
2.1	Arten der Verformung	31
2.2	Spannung und Dehnung	31
2.2.1	Spannung	32
2.2.2	Dehnung	34
2.3	Atomare Wechselwirkungen	37
2.4	Hookesches Gesetz	39
2.4.1	Energie der elastischen Verformung	42
* 2.4.2	Elastische Verformung bei mehrachsiger Beanspruchung ¹	43
* 2.4.3	Isotropes Material	46
* 2.4.4	Kubisches Kristallgitter	50
* 2.4.5	Orthorhombisches Kristallgitter und orthotrope Elastizität	52
* 2.4.6	Transversal-isotrope Elastizität	53
* 2.4.7	Andere Kristallgitter	54
* 2.4.8	Beispiele	54
* 2.5	Isotropie und Anisotropie makroskopischer Bauteile	55
2.6	Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls	59

¹ Abschnitte, die wie dieser mit einem * an der Abschnittsüberschrift gekennzeichnet sind, beinhalten weitergehende Informationen, die ohne Nachteil für das weitere Verständnis übersprungen werden können.

3	Plastizität und Versagen	63
3.1	Technische und wahre Dehnung	63
3.2	Spannungs-Dehnungs-Diagramme	68
3.2.1	Analyse eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms	72
3.2.2	Approximation der Spannungs-Dehnungs-Kurve	80
3.3	Plastizitätstheorie	82
3.3.1	Fließbedingungen	83
3.3.2	Fließbedingungen für Metalle	86
3.3.3	Fließbedingungen für Polymere	91
3.3.4	Fließgesetze	93
3.3.5	Verfestigungsgesetze	97
* 3.3.6	Anwendung von Fließbedingung, Fließgesetz und Verfestigungsgesetz	102
* 3.4	Härte	106
* 3.4.1	Ritzverfahren	107
* 3.4.2	Eindruckverfahren	108
* 3.4.3	Rücksprungverfahren	110
3.5	Werkstoffversagen	110
3.5.1	Gleitbruch	111
3.5.2	Spaltbruch	114
3.5.3	Bruchkriterien	116
4	Kerben	119
4.1	Kerbformzahl	119
4.2	Neuber-Regel	121
* 4.3	Kerbeeinfluss im Zugversuch	125
5	Bruchmechanik	129
5.1	Einführung in die Bruchmechanik	129
5.1.1	Begriffsdefinitionen	129
5.2	Linear-elastische Bruchmechanik	131
5.2.1	Spannungsfeld an der Rissspitze	131
5.2.2	Energiebetrachtung bei Rissfortschritt	134
5.2.3	Statische Auslegung rissbehafteter Bauteile	142
5.2.4	Materialkennwerte verschiedener Werkstoffe	145
5.2.5	Werkstoffverhalten bei Rissfortschritt	147
* 5.2.6	Unterkritisches Risswachstum	150
* 5.2.7	Experimentelle Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte	152
* 5.3	Fließbruchmechanik	158
* 5.3.1	Rissspitzenöffnung (CTOD)	159
* 5.3.2	J-Integral	159
* 5.3.3	Werkstoffverhalten bei Rissfortschritt	162
* 5.3.4	Experimentelle Bestimmung fließbruchmechanischer Kennwerte	163

6	Mechanisches Verhalten der Metalle	165
6.1	Theoretische Festigkeit	165
6.2	Versetzungen	166
6.2.1	Versetzungstypen	166
6.2.2	Spannungsfeld um eine Versetzung	168
6.2.3	Bewegung von Versetzungen	171
6.2.4	Gleitsysteme	174
6.2.5	Schmid'sches Schubspannungsgesetz	178
6.2.6	Taylorfaktor	181
6.2.7	Wechselwirkung von Versetzungen	183
6.2.8	Entstehung, Multiplikation und Vernichtung von Versetzungen	184
6.2.9	Kräfte auf Versetzungen	186
6.3	Überwindung von Hindernissen	189
6.3.1	Athermische Vorgänge	189
6.3.2	Thermisch aktivierte Hindernis-Überwindung	193
6.3.3	Duktil-Spröd-Übergang	196
6.3.4	Klettern	196
6.3.5	Schneiden von Versetzungen	197
6.4	Verfestigungsmechanismen	198
6.4.1	Verformungsverfestigung	199
6.4.2	Feinkornhärtung	200
6.4.3	Mischkristallhärtung	204
6.4.4	Teilchenhärtung	209
6.4.5	Härten von Stahl	219
*6.5	Mechanische Zwillingbildung	224
7	Mechanisches Verhalten der Keramiken	227
7.1	Herstellung von Keramiken	227
7.2	Mechanismen der Rissausbreitung	228
7.2.1	Verlängerung des Risspfades	229
7.2.2	Rissbrückeneffekte	230
7.2.3	Mikrorissbildung und Rissverzweigung	230
7.2.4	Spannungsinduzierte Phasentransformationen	232
7.2.5	Stabiles Risswachstum	233
*7.2.6	Unterkritisches Risswachstum	234
7.3	Statistische Bruchmechanik	235
7.3.1	Weibullstatistik	236
*7.3.2	Weibullstatistik bei unterkritischem Risswachstum	241
*7.3.3	Ermittlung der Werkstoffkennwerte σ_0 und m	242
*7.4	Überlastversuch	245
7.5	Maßnahmen zur Festigkeitssteigerung	248
7.5.1	Reduzierung der Defektgröße	248
7.5.2	Umlenken der Rissfront	249
7.5.3	Wirkung von Mikrorissen	250
7.5.4	Umwandlungsverstärkung	252

7.5.5	Einbringen duktiler Phasen	254
8	Mechanisches Verhalten der Polymere	257
8.1	Physikalische Eigenschaften der Polymere	257
8.1.1	Relaxationsprozesse	257
8.1.2	Glasübergangstemperatur	260
8.1.3	Schmelztemperatur	261
8.2	Zeitabhängige Verformung der Polymere	263
8.2.1	Phänomenologische Beschreibung der Zeitabhängigkeit	263
8.2.2	Zeitabhängigkeit und thermische Aktivierung	267
8.3	Elastische Eigenschaften der Polymere	270
8.3.1	Elastische Eigenschaften der Thermoplaste	270
8.3.2	Elastische Eigenschaften von Elastomeren und Duromeren	274
8.4	Plastisches Verhalten	275
8.4.1	Amorphe Thermoplaste	275
8.4.2	Teilkristalline Thermoplaste	281
8.5	Maßnahmen zur Erhöhung der Temperaturbeständigkeit	284
8.5.1	Erhöhung der Glas-temperatur und der Schmelztemperatur	285
8.5.2	Erhöhung des kristallinen Anteils	287
8.6	Maßnahmen zur Erhöhung von Festigkeit und Elastizitätsmodul	289
8.7	Maßnahmen zur Erhöhung der Duktilität	290
* 8.8	Umwelteinflüsse	292
9	Mechanisches Verhalten der Faserverbundwerkstoffe	295
9.1	Arten der Verstärkung	296
9.1.1	Charakterisierung nach Verstärkungsgeometrien	296
9.1.2	Charakterisierung nach Matrixsystemen	299
9.2	Elastizität von Faserverbundwerkstoffen	300
9.2.1	Parallelschaltung der Fasern	300
9.2.2	Reihenschaltung der Fasern	301
* 9.2.3	Allgemeine Betrachtung der Anisotropie	302
9.3	Plastizität und Bruch von Verbundwerkstoffen	303
9.3.1	Zugbelastung bei unendlich langen Fasern	303
9.3.2	Kraftübertragung zwischen Matrix und Faser	305
9.3.3	Rissausbreitung in Faserverbunden	309
9.3.4	Statistische Betrachtung des Versagens	312
9.3.5	Versagen unter Druck	313
9.3.6	Matrixdominiertes Versagen und beliebige Lastfälle	315
9.4	Beispiele für Verbundsysteme	316
9.4.1	Polymermatrix-Verbundwerkstoffe	316
9.4.2	Metallmatrix-Verbunde	321
9.4.3	Keramikmatrix-Verbunde	323
* 9.4.4	Biologische Verbundwerkstoffe	325

10 Werkstoffermüdung	333
10.1 Belastungsarten	333
10.2 Ermüdungsversagen von Metallen	336
10.2.1 Anrissbildung	337
10.2.2 Risswachstum (Ausbreitungsstadium II)	342
10.2.3 Restbruch	344
10.3 Ermüdungsversagen von Keramiken	344
10.4 Ermüdungsversagen von Polymeren	345
10.4.1 Thermische Ermüdung	346
10.4.2 Mechanische Ermüdung	346
10.5 Ermüdungsversagen von Faserverbundwerkstoffen	347
10.6 Phänomenologische Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit	349
10.6.1 Rissfortschrittskurven	349
10.6.2 Wöhlerdiagramme	357
10.6.3 Mittelspannungseinfluss	366
* 10.6.4 Schadensakkumulationsregeln	369
* 10.6.5 Zyklisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten	370
* 10.6.6 Kitagawa-Diagramm	374
* 10.7 Einfluss von Kerben	376
11 Kriechen	383
11.1 Phänomenologie	383
11.2 Kriechmechanismen	388
11.2.1 Kriechstadien	388
11.2.2 Versetzungskriechen	389
11.2.3 Diffusionskriechen	392
11.2.4 Korngrenzengleiten	395
11.2.5 Verformungsmechanismen-Diagramme	397
11.3 Kriechbruch	399
11.4 Erhöhung der Kriechbeständigkeit von Werkstoffen	402
12 Aufgaben	409
1 Packungsdichten von Kristallen	409
2 Makromoleküle	409
3 Wechselwirkung zwischen zwei Atomen	409
4 Kompressionsmodul	410
5 Zusammenhang zwischen den elastischen Konstanten	410
6 Bonbonwurfmaschine	410
7 Wahre Dehnung	411
8 Zinsrechnung	412
9 Große Deformationen	412
10 Fließkriterien	412
11 Fließkriterien für Polymere	412
12 Auslegung einer gekerbten Welle	413
13 Atomare Abschätzung der Bruchzähigkeit K_{Ic}	413

14	Bestimmung der Bruchzähigkeit K_{Ic}	414
15	Statische Auslegung eines Rohres	415
16	Theoretische Festigkeit	415
17	Abschätzung der Versetzungsdichte	416
18	Thermisch aktivierte Entstehung von Versetzungen	416
19	Verformungsverfestigung	416
20	Feinkornhärtung	417
21	Ausscheidungshärtung	417
22	Weibullstatistik	417
23	Auslegung eines Flüssigkeitsbehälters	417
24	Unterkritisches Risswachstum eines Keramikbauteils	418
25	Mechanische Modelle für viskoelastische Polymere	419
26	Elastische Dämpfung	420
27	Eyring-Plot	420
28	Elastizität von Faserverbundwerkstoffen	420
29	Eigenschaften eines Polymermatrix-Verbundes	421
30	Abschätzung der Bruchschwingspielzahl	421
31	Miner-Regel	422
32	Larson-Miller-Parameter	423
33	Kriechverformung	423
34	Abbau thermischer Spannungen durch Kriechen	423
13 Lösungen		425
Anhang		449
A Tensorrechnung		451
A.1	Einführung	451
A.2	Tensorstufen	451
A.3	Schreibweisen	452
A.4	Rechenoperationen und einsteinsche Summenkonvention	453
A.5	Koordinatentransformationen	455
A.6	Wichtige Konstanten und Tensorfunktionen	457
A.7	Invarianten	458
A.8	Ableitungen von Tensoren	459
B Millersche und miller-bravaissche Indizes		461
B.1	Millersche Indizes	461
B.2	Millerbravaissche Indizes	461
C Thermodynamische Grundlagen		463
C.1	Thermische Aktivierung	463
C.2	Freie Energie und freie Enthalpie	464
C.3	Phasenübergänge und Phasendiagramme	466

D Das J-Integral	471
D.1 Unstetigkeiten, Singularitäten und der gaußsche Integralsatz	471
D.2 Energie-Impuls-Tensor	473
D.3 J -Integral	474
D.4 J -Integral um eine Rissspitze	476
D.5 Plastizität an der Rissspitze	479
D.6 Energie-Interpretation des J -Integrals	480
Literatur	483
Verzeichnis wichtiger Formelzeichen	493
Stichwortverzeichnis	497