

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-der-Waals-Bindung	20
1.3.5	Wasserstoffbrückenbindung	20
1.3.6	Kristallstruktur von Keramiken	21
1.3.7	Amorphe Keramiken	23
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	Energie der elastischen Verformung	39
2.5	Hookesches Gesetz	40
2.5.1	Elastische Verformung bei einachsiger Beanspruchung	40
* 2.5.2	Elastische Verformung bei mehrachsiger Beanspruchung ¹	43
* 2.5.3	Isotropes Material	46
* 2.5.4	Kubisches Kristallgitter	51
* 2.5.5	Orthorhombisches Kristallgitter und orthotrope Elastizität	53
* 2.5.6	Transversal-isotrope Elastizität	54
* 2.5.7	Andere Kristallgitter	54
* 2.5.8	Beispiele	55
* 2.6	Isotropie und Anisotropie makroskopischer Bauteile	55
2.7	Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls	60

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	Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Diagramme	68
3.2.2	Analyse eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms	72
3.2.3	Approximation der Spannungs-Dehnungs-Kurve	79
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	96
* 3.3.6	Anwendung von Fließbedingung, Fließgesetz und Verfestigungsgesetz	102
* 3.4	Härte	107
* 3.4.1	Ritzverfahren	107
* 3.4.2	Eindruckverfahren	107
* 3.4.3	Rücksprungverfahren	109
3.5	Werkstoffversagen	110
3.5.1	Gleitbruch	110
3.5.2	Spaltbruch	113
3.5.3	Bruchkriterien	115
4	Kerben	119
4.1	Kerbformzahl	119
4.2	Neuber-Regel	121
* 4.3	Kerbeinfluss 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 Risspitze	131
5.2.2	Energiebetrachtung bei Rissfortschritt	134
5.2.3	Statische Auslegung rissbehafteter Bauteile	143
5.2.4	Materialkennwerte verschiedener Werkstoffe	145
5.2.5	Werkstoffverhalten bei Rissfortschritt	146
* 5.2.6	Unterkritisches Risswachstum	150
* 5.2.7	Experimentelle Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte	153
* 5.3	Fließbruchmechanik	159
* 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	198
6.4.2	Mischkristallhärtung	200
6.4.3	Teilchenhärtung	206
6.4.4	Feinkornhärtung	215
6.4.5	Härten von Stahl	220
* 6.5	Mechanische Zwillingsbildung	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	231
7.2.4	Spannungsinduzierte Phasentransformationen	232
7.2.5	Stabiles Risswachstum	233
* 7.2.6	Unterkritisches Risswachstum	234
7.3	Statistische Bruchmechanik	236
7.3.1	Weibullstatistik	236
* 7.3.2	Weibullstatistik bei unterkritischem Risswachstum	242
* 7.3.3	Ermittlung der Werkstoffkennwerte σ_0 und m	242
* 7.4	Überlastversuch	246
7.5	Maßnahmen zur Festigkeitssteigerung	248
7.5.1	Reduzierung der Defektgröße	249
7.5.2	Umlenken der Rissfront	249
7.5.3	Wirkung von Mikrorissen	251

7.5.4	Umwandlungsverstärkung	252
7.5.5	Einbringen duktiler Phasen	255
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 Glastemperatur 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	300
9.2	Elastizität von Faserverbundwerkstoffen	302
9.2.1	Belastung in Faserrichtung	302
9.2.2	Belastung quer zur Faserrichtung	303
* 9.2.3	Allgemeine Betrachtung der Anisotropie	304
9.3	Plastizität und Bruch von Verbundwerkstoffen	304
9.3.1	Zugbelastung bei unendlich langen Fasern	305
9.3.2	Kraftübertragung zwischen Matrix und Faser	307
9.3.3	Rissausbreitung in Faserverbunden	310
9.3.4	Statistische Betrachtung des Versagens	314
9.3.5	Versagen unter Druck	316
9.3.6	Matrixdominiertes Versagen und beliebige Lastfälle	317
9.4	Beispiele für Verbundsysteme	318
9.4.1	Polymermatrix-Verbundwerkstoffe	318
9.4.2	Metallmatrix-Verbunde	324
9.4.3	Keramikmatrix-Verbunde	326
* 9.4.4	Biologische Verbundwerkstoffe	328

10 Werkstoffermüdung	335
10.1 Belastungsarten	335
10.2 Ermüdungsversagen von Metallen	339
10.2.1 Anrissbildung	339
10.2.2 Risswachstum (Ausbreitungsstadium II)	344
10.2.3 Restbruch	346
10.3 Ermüdungsversagen von Keramiken	346
10.4 Ermüdungsversagen von Polymeren	347
10.4.1 Thermische Ermüdung	348
10.4.2 Mechanische Ermüdung	348
10.5 Ermüdungsversagen von Faserverbundwerkstoffen	349
10.6 Phänomenologische Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit	351
10.6.1 Rissfortschrittskurven	351
10.6.2 Wöhlerdiagramme	359
10.6.3 Mittelspannungseinfluss	368
* 10.6.4 Schadensakkumulationsregeln	371
* 10.6.5 Zyklisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten	372
* 10.6.6 Kitagawa-Diagramm	376
* 10.7 Einfluss von Kerben	378
11 Kriechen	385
11.1 Phänomenologie	385
11.2 Kriechmechanismen	391
11.2.1 Kriechstadien	391
11.2.2 Versetzungskriechen	391
11.2.3 Diffusionskriechen	395
11.2.4 Korngrenzengleiten	398
11.2.5 Verformungsmechanismen-Diagramme	399
11.3 Kriechbruch	402
11.4 Erhöhung der Kriechbeständigkeit von Werkstoffen	405
12 Aufgaben	411
1 Packungsdichten von Kristallen	411
2 Makromoleküle	411
3 Wechselwirkung zwischen zwei Atomen	411
4 Bauteilauslegung	412
5 Kompressionsmodul	412
6 Zusammenhang zwischen den elastischen Konstanten	413
7 Bonbonwurfmaschine	413
8 Wahre Dehnung	414
9 Zinsrechnung	414
10 Große Deformationen	415
11 Fließkriterien	415
12 Fließkriterien für Polymere	415
13 Auslegung einer gekerbten Welle	415

14	Abschätzung der Bruchzähigkeit K_{Ic} auf atomarer Ebene	416
15	Bestimmung der Bruchzähigkeit K_{Ic}	417
16	Statische Auslegung eines Rohres	417
17	Theoretische Festigkeit	418
18	Abschätzung der Versetzungsdichte	418
19	Thermisch aktivierte Entstehung von Versetzungen	419
20	Verformungsverfestigung	419
21	Feinkornhärtung	419
22	Ausscheidungshärtung	419
23	Weibullstatistik	420
24	Auslegung eines Flüssigkeitsbehälters	420
25	Unterkritisches Risswachstum eines Keramikbauteils	421
26	Mechanische Modelle für viskoelastische Polymere	422
27	Elastische Dämpfung	422
28	Eyring-Plot	423
29	Elastizität von Faserverbundwerkstoffen	423
30	Eigenschaften eines Polymermatrix-Verbundes	424
31	Coffin-Manson-Basquin-Gesetz	424
32	Abschätzung der Versagensschwingspielzahl	424
33	Miner-Regel	425
34	Larson-Miller-Parameter	426
35	Kriechverformung	426
36	Abbau thermischer Spannungen durch Kriechen	427
13	Lösungen	429
	Anhang	455
A	Tensorrechnung	457
A.1	Einführung	457
A.2	Tensorstufen	457
A.3	Schreibweisen	458
A.4	Rechenoperationen und einsteinsche Summenkonvention	459
A.5	Koordinatentransformationen	461
A.6	Wichtige Konstanten und Tensoroperationen	463
A.7	Invarianten	463
A.8	Ableitungen von Tensorfeldern	465
B	Millersche und miller-bravaissche Indizes	467
B.1	Millersche Indizes	467
B.2	Miller-bravaissche Indizes	467
C	Thermodynamische Grundlagen	469
C.1	Thermische Aktivierung	469
C.2	Freie Energie und freie Enthalpie	470
C.3	Phasenübergänge und Phasendiagramme	472

D Das J-Integral	477
D.1 Unstetigkeiten, Singularitäten und der gaußsche Integralsatz	477
D.2 Energie-Impuls-Tensor	479
D.3 J -Integral	480
D.4 J -Integral um eine Rissspitze	482
D.5 Plastizität an der Rissspitze	485
D.6 Energie-Interpretation des J -Integrals	486
Literatur	491
Verzeichnis wichtiger Formelzeichen	501
Stichwortverzeichnis	505