

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

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	73
3.2.3	Approximation der Spannungs-Dehnungs-Kurve	80
3.3	Plastizitätstheorie	83
3.3.1	Fließbedingungen	83
3.3.2	Fließbedingungen für Metalle	86
3.3.3	Fließbedingungen für Polymere	91
3.3.4	Fließgesetze	94
3.3.5	Verfestigungsgesetze	97
* 3.3.6	Anwendung von Fließbedingung, Fließgesetz und Verfestigungsgesetz . .	103
* 3.4	Härte	107
* 3.4.1	Ritzverfahren	108
* 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	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	Risspitzenöffnung (CTOD)	159
* 5.3.2	J -Integral	160
* 5.3.3	Werkstoffverhalten bei Rissfortschritt	162
* 5.3.4	Experimentelle Bestimmung fließbruchmechanischer Kennwerte	164

6	Mechanisches Verhalten der Metalle	167
6.1	Theoretische Festigkeit	167
6.2	Versetzen	168
6.2.1	Versetzungstypen	168
6.2.2	Spannungsfeld um eine Versetzung	170
6.2.3	Bewegung von Versetzungen	173
6.2.4	Gleitsysteme	176
6.2.5	Schmid'sches Schubspannungsgesetz	180
6.2.6	Taylorfaktor	183
6.2.7	Wechselwirkung von Versetzungen	185
6.2.8	Entstehung, Multiplikation und Vernichtung von Versetzungen	186
6.2.9	Kräfte auf Versetzungen	189
6.3	Überwindung von Hindernissen	191
6.3.1	Athermische Vorgänge	191
6.3.2	Thermisch aktivierte Hindernis-Überwindung	195
6.3.3	Duktil-Spröd-Übergang	198
6.3.4	Klettern	198
6.3.5	Schneiden von Versetzungen	199
6.4	Verfestigungsmechanismen	200
6.4.1	Verformungsverfestigung	200
6.4.2	Mischkristallhärtung	202
6.4.3	Teilchenhärtung	208
6.4.4	Feinkornhärtung	218
6.4.5	Härten von Stahl	222
* 6.5	Mechanische Zwillingsbildung	227
7	Mechanisches Verhalten der Keramiken	231
7.1	Herstellung von Keramiken	231
7.2	Mechanismen der Rissausbreitung	232
7.2.1	Verlängerung des Risspfades	233
7.2.2	Rissbrückeneffekte	234
7.2.3	Mikrorissbildung und Rissverzweigung	235
7.2.4	Spannungsinduzierte Phasentransformationen	236
7.2.5	Stabiles Risswachstum	237
* 7.2.6	Unterkritisches Risswachstum	238
7.3	Statistische Bruchmechanik	240
7.3.1	Weibullstatistik	240
* 7.3.2	Weibullstatistik bei unterkritischem Risswachstum	246
* 7.3.3	Ermittlung der Werkstoffkennwerte σ_0 und m	246
* 7.4	Überlastversuch	250
7.5	Maßnahmen zur Festigkeitssteigerung	252
7.5.1	Reduzierung der Defektgröße	253
7.5.2	Umlenken der Rissfront	253
7.5.3	Wirkung von Mikrorissen	255

7.5.4	Umwandlungsverstärkung	256
7.5.5	Einbringen duktiler Phasen	259
8	Mechanisches Verhalten der Polymere	261
8.1	Physikalische Eigenschaften der Polymere	261
8.1.1	Relaxationsprozesse	261
8.1.2	Glasübergangstemperatur	264
8.1.3	Schmelztemperatur	266
8.2	Zeitabhängige Verformung der Polymere	267
8.2.1	Phänomenologische Beschreibung der Zeitabhängigkeit	268
8.2.2	Zeitabhängigkeit und thermische Aktivierung	271
8.3	Elastische Eigenschaften der Polymere	274
8.3.1	Elastische Eigenschaften der Thermoplaste	274
8.3.2	Elastische Eigenschaften von Elastomeren und Duromeren	278
8.4	Plastisches Verhalten	279
8.4.1	Amorphe Thermoplaste	280
8.4.2	Teilkristalline Thermoplaste	286
8.5	Maßnahmen zur Erhöhung der Temperaturbeständigkeit	289
8.5.1	Erhöhung der Glas-temperatur und der Schmelztemperatur	289
8.5.2	Erhöhung des kristallinen Anteils	292
8.6	Maßnahmen zur Erhöhung von Festigkeit und Elastizitätsmodul	294
8.7	Maßnahmen zur Erhöhung der Duktilität	295
*8.8	Umwelteinflüsse	297
9	Mechanisches Verhalten der Faserverbundwerkstoffe	299
9.1	Arten der Verstärkung	300
9.1.1	Charakterisierung nach Verstärkungsgeometrien	300
9.1.2	Charakterisierung nach Matrixsystemen	304
9.2	Elastizität von Faserverbundwerkstoffen	306
9.2.1	Belastung in Faserrichtung	306
9.2.2	Belastung quer zur Faserrichtung	307
*9.2.3	Allgemeine Betrachtung der Anisotropie	308
9.3	Plastizität und Bruch von Verbundwerkstoffen	308
9.3.1	Zugbelastung bei unendlich langen Fasern	309
9.3.2	Kraftübertragung zwischen Matrix und Faser	311
9.3.3	Rissausbreitung in Faserverbunden	314
9.3.4	Statistische Betrachtung des Versagens	318
9.3.5	Versagen unter Druck	320
9.3.6	Matrixdominiertes Versagen und beliebige Lastfälle	321
9.4	Beispiele für Verbundsysteme	322
9.4.1	Polymermatrix-Verbundwerkstoffe	322
9.4.2	Metallmatrix-Verbunde	328
9.4.3	Keramikmatrix-Verbunde	330
*9.4.4	Biologische Verbundwerkstoffe	332

10 Werkstoffermüdung	339
10.1 Belastungsarten	339
10.2 Ermüdungsversagen von Metallen	343
10.2.1 Anrissbildung und Mikrorisswachstum	343
10.2.2 Risswachstum (Ausbreitungsstadium II)	348
10.2.3 Restbruch	351
10.3 Ermüdungsversagen von Keramiken	351
10.4 Ermüdungsversagen von Polymeren	352
10.4.1 Thermische Ermüdung	352
10.4.2 Mechanische Ermüdung	353
10.5 Ermüdungsversagen von Faserverbundwerkstoffen	354
10.6 Phänomenologische Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit	355
10.6.1 Rissfortschrittskurven	356
10.6.2 Wöhlerdiagramme	364
10.6.3 Mittelspannungseinfluss	373
* 10.6.4 Schadensakkumulationsregeln	376
* 10.6.5 Zyklisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten	377
* 10.6.6 Kitagawa-Diagramm	380
* 10.7 Einfluss von Kerben	383
11 Kriechen	391
11.1 Phänomenologie	391
11.2 Kriechmechanismen	398
11.2.1 Kriechstadien	398
11.2.2 Versetzungskriechen	398
11.2.3 Diffusionskriechen	402
11.2.4 Korngrenzengleiten	405
11.2.5 Verformungsmechanismen-Diagramme	406
11.3 Kriechbruch	409
11.4 Erhöhung der Kriechbeständigkeit von Werkstoffen	413
11.4.1 Behinderung der Diffusion	414
11.4.2 Mischkristallhärtung	414
11.4.3 Ausscheidungshärtung	415
* 11.4.4 Dispersionshärtung	416
11.4.5 Härtung durch grobe Körner	417
11.4.6 Behinderung des Korngrenzengleitens	417
11.4.7 Ungeeignete Verfestigungsmechanismen	419
11.4.8 Beispiele	419
12 Aufgaben	421
1 Packungsdichten von Kristallen	421
2 Makromoleküle	421
3 Wechselwirkung zwischen zwei Atomen	421
4 Bauteilauslegung	422
5 Kompressionsmodul	422

6	Zusammenhang zwischen den elastischen Konstanten	423
7	Bonbonwurfmaschine	423
8	Wahre Dehnung	424
9	Zinsrechnung	424
10	Große Deformationen	425
11	Fließkriterien	425
12	Fließkriterien für Polymere	425
13	Auslegung einer gekerbten Welle	425
14	Abschätzung der Bruchzähigkeit K_{Ic} auf atomarer Ebene	426
15	Bestimmung der Bruchzähigkeit K_{Ic}	427
16	Statische Auslegung eines Rohres	427
17	Theoretische Festigkeit	428
18	Abschätzung der Versetzungsdichte	429
19	Thermisch aktivierte Entstehung von Versetzungen	429
20	Verformungsverfestigung	429
21	Feinkornhrtung	429
22	Ausscheidungshärtung	430
23	Weibullstatistik	430
24	Auslegung eines Flüssigkeitsbehälters	430
25	Unterkritisches Risswachstum eines Keramikbauteils	431
26	Mechanische Modelle für viskoelastische Polymere	432
27	Elastische Dämpfung	432
28	Eyring-Plot	433
29	Elastizität von Faserverbundwerkstoffen	433
30	Eigenschaften eines Polymermatrix-Verbundes	434
31	Coffin-Manson-Basquin-Gesetz	434
32	Abschätzung der Versagenssschwingspielzahl	435
33	Miner-Regel	435
34	Larson-Miller-Parameter	436
35	Kriechverformung	436
36	Abbau thermischer Spannungen durch Kriechen	437

13 Lösungen	439
--------------------	------------

Anhang	465
---------------	------------

A Tensorrechnung	467
A.1 Einführung	467
A.2 Tensorstufen	467
A.3 Schreibweisen	468
A.4 Rechenoperationen und einsteinsche Summenkonvention	469
A.5 Koordinatentransformationen	471
A.6 Wichtige Konstanten und Tensoroperationen	473
A.7 Invarianten	474
A.8 Ableitungen von Tensorfeldern	475

B	Millersche und miller-bravaissche Indizes	477
B.1	Millersche Indizes	477
B.2	Miller-bravaissche Indizes	477
C	Thermodynamische Grundlagen	479
C.1	Thermische Aktivierung	479
C.2	Freie Energie und freie Enthalpie	480
C.3	Phasenübergänge und Phasendiagramme	482
D	Das J-Integral	487
D.1	Unstetigkeiten, Singularitäten und der gaußsche Integralsatz	487
D.2	Energie-Impuls-Tensor	489
D.3	J -Integral	490
D.4	J -Integral um eine Rissspitze	492
D.5	Plastizität an der Rissspitze	495
D.6	Energie-Interpretation des J -Integrals	496
	Literatur	501
	Verzeichnis wichtiger Formelzeichen	511
	Wichtige Festigkeitsbegriffe	515
	Stichwortverzeichnis	519