

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufbau der Werkstoffe</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Elastisches Verhalten</b>	<b>31</b>
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 <sup>1</sup> . . . . .	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

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

<b>3 Plastizität und Versagen</b>	<b>63</b>
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
<b>4 Kerben</b>	<b>119</b>
4.1 Kerbformzahl . . . . .	119
4.2 Neuber-Regel . . . . .	121
* 4.3 Kerbeinfluss im Zugversuch . . . . .	125
<b>5 Bruchmechanik</b>	<b>129</b>
5.1 Einführung in die Bruchmechanik . . . . .	129
5.1.1 Begriffsdefinitionen . . . . .	129
5.2 Linear-elastische Bruchmechanik . . . . .	131
5.2.1 Spannungsfeld an der Riss spitze . . . . .	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 Riss spitzenöffnung (CTOD) . . . . .	159
* 5.3.2 <i>J</i> -Integral . . . . .	159
* 5.3.3 Werkstoffverhalten bei Rissfortschritt . . . . .	162
* 5.3.4 Experimentelle Bestimmung fließbruchmechanischer Kennwerte . . . . .	163

<b>6 Mechanisches Verhalten der Metalle</b>	<b>165</b>
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 Schmidsches 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 Härt(en) von Stahl . . . . .	220
* 6.5 Mechanische Zwillingsbildung . . . . .	224
<b>7 Mechanisches Verhalten der Keramiken</b>	<b>227</b>
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 untermittischem Risswachstum . . . . .	242
* 7.3.3 Ermittlung der Werkstoffkennwerte $\sigma_0$ 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
<b>8</b>	<b>Mechanisches Verhalten der Polymere</b>	<b>257</b>
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
<b>9</b>	<b>Mechanisches Verhalten der Faserverbundwerkstoffe</b>	<b>295</b>
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

<b>10 Werkstoffermüdung</b>	<b>335</b>
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
<b>11 Kriechen</b>	<b>385</b>
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
<b>12 Aufgaben</b>	<b>411</b>
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 Versetzungsichte . . . . .	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
<b>13</b>	<b>Lösungen</b> . . . . .	<b>429</b>
<b>Anhang</b>		<b>455</b>
<b>A</b>	<b>Tensorrechnung</b> . . . . .	<b>457</b>
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>B</b>	<b>Millersche und miller-bravaissche Indizes</b> . . . . .	<b>467</b>
B.1	Millersche Indizes . . . . .	467
B.2	Miller-bravaissche Indizes . . . . .	467
<b>C</b>	<b>Thermodynamische Grundlagen</b> . . . . .	<b>469</b>
C.1	Thermische Aktivierung . . . . .	469
C.2	Freie Energie und freie Enthalpie . . . . .	470
C.3	Phasenübergänge und Phasendiagramme . . . . .	472

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