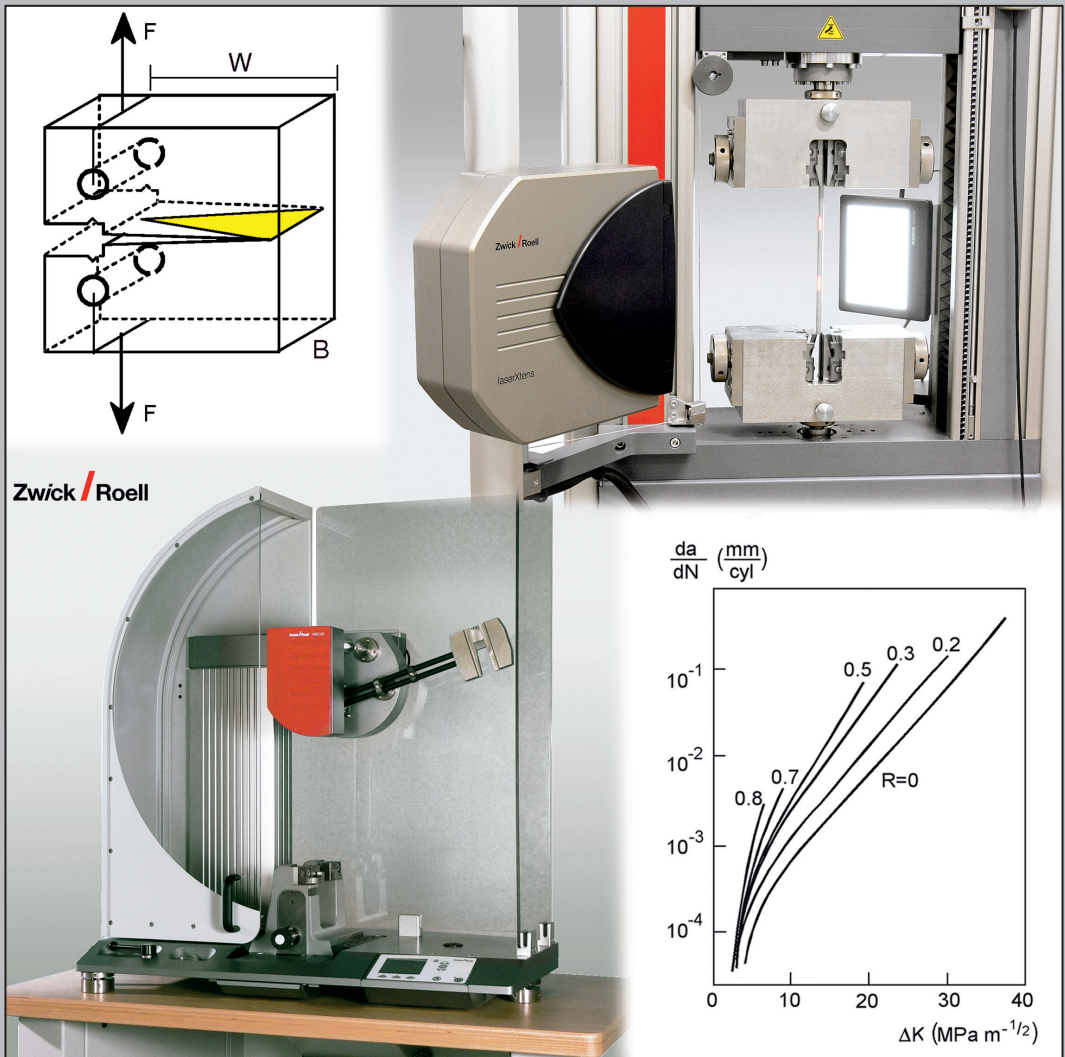


Günther Hartwig

# Eigenschaftsvergleich verschiedener Materialien

Metalle, Keramiken, Polymere, Faserverbundwerkstoffe



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zur Historie der Materialentwicklung</b> .....	13
1.1	Einführung .....	14
<b>2</b>	<b>Anwendungsprofile und Maximalwerte</b> .....	16
2.1	Metalle .....	16
2.2	Keramiken .....	17
2.3	Faserverbunde mit Polymermatrix .....	18
2.3.1	Keramikfaserverbunde .....	18
2.3.2	Glasfaserverbunde (E-Glas, S-Glas) .....	18
2.3.3	Kevlarfaserverbunde .....	18
2.3.4	Carbonfaserverbunde .....	19
2.4	Faserverbunde mit Kohlenstoff-, Keramik- oder Metallmatrix .....	19
2.5	Polymerwerkstoffe .....	20
2.6	Zusammenfassung .....	20
<b>3</b>	<b>Bindungsarten</b> .....	22
3.1	Ionische Bindung .....	22
3.2	Kovalente Bindung .....	22
3.3	Metallische Bindung .....	24
3.4	Wasserstoffbrückenbindung .....	24
3.5	Van der Waals-Bindung .....	25
3.6	Ortsabhängigkeit der Bindungspotentiale .....	25
3.7	Zusammenfassung .....	26
<b>4</b>	<b>Korrelationen von Bindungsstruktur und Eigenschaften</b> .....	27
4.1	Elastizitätsmodul und Bindungsstruktur .....	27
4.2	Duktilität und Bindungsart .....	27
4.3	Zugfestigkeit und Bindungsstruktur .....	30
4.4	Thermische Eigenschaften und Bindungsart .....	30
4.5	Zusammenfassung .....	32
<b>5</b>	<b>Deformationsverhalten</b> .....	33
5.1	Deformationsprozesse .....	34
5.1.1	Elastizität .....	34

5.1.1.1	Entropie-Elastizität . . . . .	35
5.1.1.2	Energie-Elastizität . . . . .	35
5.1.2	Viskoelastizität . . . . .	35
5.1.3	Viskose Deformation . . . . .	38
5.2	Art und Zeitprofil der Belastung . . . . .	39
5.2.1	Stufenförmige Langzeitbelastung – Kriechmodul . . . . .	39
5.2.2	Belastungsrampe mit Belastungsgeschwindigkeit bzw. Elastizitätsmodul . . . . .	41
5.2.3	Zyklische Belastung mit Winkelfrequenz bzw. komplexer Modul $E^*$ . . . . .	42
5.3	Dämpfungsdeformationen . . . . .	43
5.4	Poissonzahl $\nu$ . . . . .	46
5.5	Spezifischer Modul . . . . .	48
5.6	Zusammenfassung . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Bruchverhalten</b> . . . . .	<b>50</b>
6.1	Brucheigenschaften . . . . .	52
6.1.1	Metalle . . . . .	52
6.1.2	Keramik (Strukturkeramik) . . . . .	53
6.1.3	Fasern . . . . .	54
6.1.4	Faserverbunde mit Polymermatrix . . . . .	54
6.1.5	Polymere . . . . .	55
6.2	Spezifische Festigkeit . . . . .	57
6.3	Rissfortschrittsverhalten . . . . .	57
6.4	Thermospannungen . . . . .	60
6.5	Zeitabhängige Bruchprozesse . . . . .	61
6.6	Diffusion und Spannungsrisskorrosion . . . . .	62
6.7	Kriechprozess . . . . .	63
6.7.1	Relaxationskriechen . . . . .	63
6.7.2	Kriechbruch . . . . .	63
6.8	Unterkritisches Risswachstum . . . . .	67
6.9	Adiabatische Bruchprozesse . . . . .	70
6.10	Zähigkeitsstrategien . . . . .	71
6.10.1	Fasereinsatz . . . . .	71
6.10.2	Phasenübergänge . . . . .	72
6.11	Mechanische Parameter verschiedener Materialklassen . . . . .	72
6.12	Zusammenfassung . . . . .	73
<b>7</b>	<b>Ermüdungsverhalten bei zyklischer Belastung</b> . . . . .	<b>76</b>
7.1	Lastverhältnis $R$ . . . . .	77
7.1.1	Lastamplitude und Wöhlerkurven . . . . .	78

---

7.1.2	Lastverhältnis R und Wöhlerkurven . . . . .	78
7.1.2.1	R-Abhängigkeit der Wöhlerkurven von Metallen . . . . .	79
7.1.2.2	R-Abhängigkeit der Wöhlerkurven von Keramik (als Bulkmaterial) . . . . .	80
7.1.2.3	R-Abhängigkeit der Wöhlerkurven von Faserverbunden . . . . .	81
7.1.2.4	R-Abhängigkeit von Wöhlerkurven von Polymeren . . . . .	81
7.1.3	Lastverhältnis R und Rissfortschritt . . . . .	82
7.1.3.1	R-Abhängigkeit des Rissfortschritts bei Metallen . . . . .	82
7.1.3.2	R-Abhängigkeit des Rissfortschritts bei Keramik . . . . .	82
7.1.3.3	R-Abhängigkeit des Rissfortschritts bei Polymeren . . . . .	82
7.2	Frequenzabhängigkeiten der Ermüdung und des Rissfortschritts . . . . .	84
7.2.1	Frequenzabhängigkeit verschiedener Materialklassen . . . . .	84
7.2.1.1	Frequenzabhängigkeiten von Wöhlerkurven für Metalle . . . . .	84
7.2.1.2	Frequenzabhängigkeit des Rissfortschritts bei Metallen . . . . .	84
7.2.1.3	Frequenzabhängigkeit des Rissfortschritts bei Polymeren . . . . .	86
7.3	Temperatureinflüsse . . . . .	86
7.4	Probenerwärmung bei der Erstellung von Wöhlerkurven . . . . .	86
7.5	Wöhlerkurven und Dauerfestigkeiten . . . . .	88
7.6	Rissfortschrittskurven bei zyklischer Belastung . . . . .	89
7.7	Matrixabhängigkeit der Wöhlerkurven von UD-Faserverbunden . . . . .	90
7.8	Matrixabhängigkeit der Ermüdung von Faserverbunden . . . . .	92
7.9	Korngrößenabhängigkeit der Ermüdung von Keramik . . . . .	94
7.10	Moduldegradation bei zyklischer Belastung . . . . .	95
7.10.1	Moduldegradation verschiedener Materialklassen . . . . .	95
7.10.1.1	Moduldegradation von Keramiken . . . . .	95
7.10.1.2	Moduldegradation von Polymeren . . . . .	95
7.10.1.3	Moduldegradation von Faserverbunden mit Polymermatrix . . . . .	95
7.11	Zusammenfassung . . . . .	96
<b>8</b>	<b>Spezifische Wärme . . . . .</b>	<b>98</b>
8.1	Grundlagen . . . . .	99
8.2	Spezifische Wärme einzelner Materialklassen . . . . .	100
8.2.1	Spezifische Wärme von Metallen . . . . .	100
8.2.2	Spezifische Wärme von Keramik . . . . .	101
8.2.3	Spezifische Wärme von Polymeren . . . . .	102
8.2.4	Spezifische Wärme von Polymerfaserverbunden . . . . .	102
8.3	Zusammenfassung . . . . .	104

<b>9</b>	<b>Thermische Ausdehnung</b>	105
9.1	Allgemeine Grundlagen	106
9.1.1	Potentiale und Schwingungen	106
9.1.1.1	Schwingungsmoden	107
9.1.1.2	Phasen- und Glasübergänge	108
9.2	Thermische Ausdehnung verschiedener Materialklassen	108
9.2.1	Thermische Ausdehnung von Polymeren	108
9.2.1.1	Ausdehnung durch Schwingungserhöhung	108
9.2.1.2	Ausdehnung durch Glasübergänge bei Polymeren	109
9.2.2	Thermische Ausdehnung von Faserverbunden	110
9.3	Thermische Ausdehnung von Teilchenverbunden	111
9.4	Thermische Ausdehnung durch Phasenübergänge	112
9.5	Grüneisen-Beziehung	114
9.6	Zusammenfassung	115
<b>10</b>	<b>Thermische Leitfähigkeit</b>	117
10.1	Allgemeine Grundlagen	119
10.2	Wärmeleitfähigkeit einzelner Materialklassen	120
10.2.1	Wärmeleitfähigkeit von Metallen	120
10.2.2	Wärmeleitfähigkeit von nichtmetallischen Kristallen	120
10.2.3	Wärmeleitfähigkeit amorpher Nichtmetalle	121
10.2.4	Wärmeleitfähigkeit amorpher Polymere	121
10.2.5	Wärmeleitfähigkeit teilkristalliner Polymere	122
10.2.6	Wärmeleitfähigkeit von Teilchenverbunden	122
10.2.7	Wärmeleitfähigkeit anisotroper Materialien	123
10.3	Wärmeleitfähigkeit pro Festigkeit oder pro Modul	126
10.4	Wärmediffusion	127
10.5	Zusammenfassung	129
<b>11</b>	<b>Elektrische Eigenschaften</b>	130
11.1	Spezifische Leitfähigkeit	130
11.2	Energiebänder	132
11.3	Elektrische Leitfähigkeit	133
11.3.1	Leitfähigkeit von Metallen	133
11.3.2	Leitfähigkeit von Legierungen	134
11.3.3	Halbleiter (HL)	134
11.3.4	Elektrisch leitfähige Polymere	136
11.3.5	Supraleitung (SL)	136
11.4	Elektrische und thermische Leitfähigkeit	139
11.5	Dielektrische Eigenschaften	139
11.5.1	Dielektrizitätskonstante $\epsilon'$	139
11.5.2	Dielektrische Dämpfung	141

---

11.6	Polarisationseigenschaften	144
11.6.1	Ferroelektrizität	144
11.6.2	Piezoelektrizität	145
11.6.3	Pyroelektrizität	145
11.6.4	Elektrete	146
11.6.5	Elektrisches Durchschlagsverhalten	146
11.7	Zusammenfassung	148
<b>12</b>	<b>Temperaturabhängigkeit</b>	<b>150</b>
12.1	Generelles Temperaturverhalten	150
12.1.1	Thermische Eigenschaften (Phononenanteil)	150
12.1.2	Thermische Eigenschaften (Elektronenanteil)	151
12.1.3	Mechanische Eigenschaften	151
12.1.4	Elektrische Eigenschaften	151
12.1.5	Dielektrische Eigenschaften	151
12.2	Tieftemperatureinflüsse	151
12.3	Hochtemperaturparameter	152
12.4	Mechanische Eigenschaften	154
12.4.1	Elastizitätsmodul und Festigkeit	154
12.4.2	Temperaturabhängigkeit der mechanischen Ermüdung	158
12.4.3	Temperaturabhängigkeit der mechanischen Dämpfung	160
12.4.4	Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit und Bruchenergie	161
12.4.4.1	Temperaturabhängigkeit von $K_{Ic}$ für Metalle	161
12.4.4.2	Temperaturabhängigkeit von $K_{Ic}$ und $G_{Ic}$ für Keramik	161
12.4.4.3	Temperaturabhängigkeit von $K_{Ic}$ und $G_{Ic}$ für Polymere	162
12.4.5	Rissfortschritt bei zyklischer Belastung	163
12.5	Temperaturabhängigkeit von thermischen Eigenschaften	164
12.5.1	Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme	164
12.5.1.1	Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme von Polymeren	165
12.5.2	Temperaturabhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit	166
12.5.2.1	Temperaturabhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit von Metallen	169
12.5.2.2	Temperaturabhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit von Keramik	170
12.5.2.3	Temperaturabhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit von Polymeren	170

12.5.3	Temperaturabhängigkeit der thermischen Ausdehnung . . . . .	170
12.5.3.1	Temperaturabhängigkeit der thermischen Ausdehnung von Metallen und Legierungen. . . . .	171
12.5.3.2	Temperaturabhängigkeit der thermischen Ausdehnung von Keramik . . . . .	172
12.5.3.3	Temperaturabhängigkeit der thermischen Ausdehnung von Polymeren . . . . .	173
12.5.3.4	Thermische Ausdehnung von Faserverbunden mit Polymermatrix . . . . .	174
12.6	Temperaturabhängigkeit der elektrischen Eigenschaften . . . . .	175
12.6.1	Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes $\rho$ . . . . .	175
12.6.1.1	Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Metallen und Legierungen . . . . .	176
12.6.1.2	Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Keramik . . . . .	177
12.6.1.3	Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Polymeren . . . . .	177
12.6.1.4	Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes von Faserverbunden mit Polymermatrix . . . . .	178
12.6.2	Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten $\epsilon_c$ und des Verlustfaktors $\tan \delta_c$ . . . . .	178
12.6.2.1	Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätsgrößen von Keramik . . . . .	178
12.6.2.2	Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätsgrößen von Polymeren. . . . .	179
12.6.2.3	Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätsgrößen von Faserverbunden . . . . .	181
12.6.3	Temperaturabhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit $V_D$ . . . . .	181
12.6.3.1	Temperaturabhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit von Glas und Keramik. . . . .	182
12.6.3.2	Temperaturabhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit von Polymeren. . . . .	182
12.6.3.3	Temperaturabhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit von Faserpolymerverbunden . . . . .	183
12.6.4	Temperatur- und Zeitabhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit . . . . .	183
<b>13</b>	<b>Literatur</b> . . . . .	<b>184</b>
<b>14</b>	<b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .	<b>191</b>