

Leseprobe

Wolfgang Grellmann, Sabine Seidler

Kunststoffprüfung

ISBN (Buch): 978-3-446-44350-1

ISBN (E-Book): 978-3-446-44390-7

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44350-1>

sowie im Buchhandel.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort zur 3. Auflage</b> .....	V
<b>Vorwort zur 2. Auflage</b> .....	VI
<b>Vorwort zur 1. Auflage</b> .....	VIII
<b>Die Herausgeber</b> .....	XI
Wolfgang Grellmann .....	XI
Sabine Seidler .....	XI
Mitautoren .....	XII
<b>Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen (Auswahl)</b> .....	XXV
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	XXXVII
<b>Kurzzeichen für Kunststoffe</b> .....	XLI
<b>1 Einleitung</b> .....	1
1.1 Zur Herausbildung der Kunststoffprüfung als Wissenschaftsdisziplin .....	1
1.2 Einflussgrößen auf die Kennwertermittlung .....	5
1.3 Einteilung der Methoden der Kunststoffprüfung .....	6
1.4 Normen und Regelwerke in der Kunststoffprüfung .....	8
1.5 Zusammenstellung der Normen .....	11
1.6 Literaturhinweise für die einzelnen Fachgebiete .....	12
<b>2 Prüfkörperherstellung</b> .....	17
2.1 Einführung .....	17
2.2 Prüfung an Formmassen .....	19
2.3 Herstellung von Prüfkörpern .....	20
2.3.1 Allgemeine Anmerkungen .....	20
2.3.2 Prüfkörperherstellung durch direkte Formgebung .....	22
2.3.2.1 Herstellung von Prüfkörpern aus thermoplastischen Formmassen .....	22
2.3.2.2 Herstellung von Prüfkörpern aus duroplastischen Formmassen .....	29
2.3.2.3 Herstellung von Prüfkörpern aus elastomeren Werkstoffen .....	30
2.3.3 Prüfkörperherstellung durch indirekte Formgebung .....	32
2.3.4 Charakterisierung des Prüfkörperzustandes .....	34

2.4	Prüfkörpervorbereitung und Konditionierung .....	37
2.5	Zusammenstellung der Normen .....	40
2.6	Literatur .....	41
<b>3</b>	<b>Bestimmung verarbeitungsrelevanter Eigenschaften .....</b>	<b>43</b>
3.1	Formmassen .....	43
3.2	Bestimmung von Schüttguteigenschaften .....	44
3.2.1	Schüttdichte, Stopfdichte, Füllfaktor .....	44
3.2.2	Rieselfähigkeit, Schüttwinkel, Rutschwinkel .....	46
3.3	Bestimmung von Fluideigenschaften .....	47
3.3.1	Rheologische Grundlagen .....	47
3.3.1.1	Viskosität <i>Newton'scher</i> und nicht- <i>Newton'scher</i> Fluide .....	47
3.3.1.2	Temperatur- und Druckabhängigkeit der Viskosität .....	51
3.3.1.3	Molmasseneinfluss auf die Viskosität .....	51
3.3.1.4	Volumeneigenschaften .....	51
3.3.2	Messung rheologischer Eigenschaften .....	52
3.3.2.1	Rheometrie/Viskosimetrie .....	52
3.3.2.2	Rotationsrheometer .....	53
3.3.2.3	Kapillarrheometer .....	60
3.3.2.4	Dehnrheometer .....	71
3.3.3	Auswahl von Messmethoden zur rheologischen Charakterisierung von Polymerwerkstoffen .....	74
3.4	Zusammenstellung der Normen .....	75
3.5	Literatur .....	76
<b>4</b>	<b>Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen .....</b>	<b>79</b>
4.1	Grundlagen mechanischen Verhaltens .....	79
4.1.1	Mechanische Beanspruchungsgrößen .....	79
4.1.1.1	Spannung .....	79
4.1.1.2	Deformation .....	82
4.1.2	Werkstoffverhalten und Stoffgesetze .....	83
4.1.2.1	Elastisches Verhalten .....	83
4.1.2.2	Viskoses Verhalten .....	87
4.1.2.3	Viskoelastisches Verhalten .....	88
4.1.2.4	Plastisches Verhalten .....	94
4.2	Mechanische Spektroskopie .....	96
4.2.1	Experimentelle Bestimmung zeitabhängiger mechanischer Eigenschaften .....	97
4.2.1.1	Statische Prüfverfahren .....	97
4.2.1.2	Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) .....	98
4.2.2	Zeit- und Temperaturabhängigkeit der viskoelastischen Eigenschaften	106
4.2.3	Strukturelle Einflussgrößen auf die viskoelastischen Eigenschaften ....	109
4.3	Quasistatische Prüfverfahren .....	111
4.3.1	Deformationsverhalten von Kunststoffen .....	111
4.3.2	Zugversuch an Kunststoffen .....	117
4.3.2.1	Theoretische Grundlagen des Zugversuches .....	117

4.3.2.2	Der konventionelle Zugversuch .....	121
4.3.2.3	Erweiterte Aussagemöglichkeiten des Zugversuches .....	130
4.3.3	Weiterreißversuch .....	137
4.3.4	Druckversuch an Kunststoffen .....	139
4.3.4.1	Theoretische Grundlagen des Druckversuchs .....	139
4.3.4.2	Durchführung und Auswertung des Druckversuches .....	142
4.3.5	Biegeversuch an Kunststoffen .....	147
4.3.5.1	Theoretische Grundlagen des Biegeversuches .....	147
4.3.5.2	Der genormte Biegeversuch .....	153
4.4	Schlagartige Beanspruchung .....	158
4.4.1	Einführung .....	158
4.4.2	Schlagbiegeversuch und Kerbschlagbiegeversuch .....	159
4.4.3	Schlagzugversuch und Kerbschlagzugversuch .....	165
4.4.4	Fallbolzenversuch und Durchstoßversuch .....	167
4.5	Ermüdungsverhalten .....	171
4.5.1	Allgemeine Grundlagen .....	171
4.5.2	Experimentelle Ermittlung des Ermüdungsverhaltens .....	173
4.5.3	Planung und Auswertung von Ermüdungsversuchen .....	178
4.5.4	Einflussgrößen auf das Ermüdungsverhalten und die Lebensdauervorhersage von Kunststoffen .....	179
4.6	Statisches Langzeitverhalten .....	182
4.6.1	Allgemeine Grundlagen .....	182
4.6.2	Zeitstandzugversuch .....	183
4.6.3	Zeitstandbiegeversuch .....	190
4.6.4	Zeitstanddruckversuch .....	192
4.7	Härteprüfverfahren .....	193
4.7.1	Grundlagen der Härteprüfung .....	193
4.7.2	Konventionelle Härteprüfverfahren .....	195
4.7.2.1	Prüfverfahren zur Ermittlung von Härtewerten nach Entlastung .	195
4.7.2.2	Prüfverfahren zur Ermittlung von Härtewerten unter Last .....	198
4.7.2.3	Sonderverfahren .....	201
4.7.2.4	Vergleichbarkeit von Härtewerten .....	202
4.7.3	Instrumentierte Härteprüfung .....	203
4.7.3.1	Grundlagen der Messmethodik .....	203
4.7.3.2	Werkstoffkenngrößen der instrumentierten Härteprüfung .....	205
4.7.3.3	Anwendungsbeispiele .....	208
4.7.4	Korrelationen der Mikrohärtigkeit mit Streckgrenze und Zähigkeit .....	211
4.8	Reibung und Verschleiß .....	214
4.8.1	Einleitung .....	214
4.8.2	Grundlagen von Reibung und Verschleiß .....	216
4.8.2.1	Reibungskräfte .....	216
4.8.2.2	Temperaturerhöhung als Folge der Reibung .....	217
4.8.2.3	Verschleiß als Systemeigenschaft .....	218
4.8.2.4	Verschleißmechanismen und Transferfilmbildung .....	218
4.8.3	Verschleißprüfung und Verschleißkenngrößen .....	219
4.8.3.1	Ausgewählte Modell-Verschleißprüfungen .....	220

4.8.3.2	Verschleißkenngrößen und deren Ermittlung . . . . .	222
4.8.3.3	Verschleißkenngrößen und deren Darstellung . . . . .	223
4.8.4	Ausgewählte experimentelle Ergebnisse . . . . .	224
4.8.4.1	Einfluss des Gegenpartners . . . . .	224
4.8.4.2	Einfluss von Füllstoffen . . . . .	225
4.8.4.3	Einfluss der Belastungsparameter . . . . .	227
4.8.4.4	Eigenschaftsvorhersage mittels neuronaler Netze . . . . .	229
4.8.5	Abschließende Bewertung . . . . .	231
4.9	Zusammenstellung der Normen . . . . .	231
4.10	Literatur . . . . .	239
<b>5</b>	<b>Zähigkeitsbewertung mit bruchmechanischen Methoden . . . . .</b>	<b>247</b>
5.1	Einführung . . . . .	247
5.2	Stand und Entwicklungstendenzen . . . . .	248
5.3	Grundaussagen bruchmechanischer Konzepte . . . . .	250
5.3.1	Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM) . . . . .	250
5.3.2	Crack Tip Opening Displacement-(CTOD)-Konzept . . . . .	254
5.3.3	J-Integral-Konzept . . . . .	258
5.3.4	Risswiderstands-(R-)Kurven-Konzept . . . . .	260
5.4	Experimentelle Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte . . . . .	262
5.4.1	Quasistatische Beanspruchung . . . . .	262
5.4.2	Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch . . . . .	266
5.4.2.1	Prüfanordnung . . . . .	266
5.4.2.2	Einhaltung experimenteller Bedingungen . . . . .	267
5.4.2.3	Typen von Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagrammen - Optimierung der Diagrammform . . . . .	269
5.4.2.4	Spezielle Näherungsverfahren zur Bestimmung von J-Werten . .	271
5.4.2.5	Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie . . . . .	274
5.4.3	Instrumentierter Fallversuch . . . . .	276
5.5	Anwendungen in der Werkstoffentwicklung . . . . .	278
5.5.1	Bruchmechanische Zähigkeitsbewertung von modifizierten Kunststoffen . . . . .	278
5.5.1.1	Teilchengefüllte Kunststoffe . . . . .	278
5.5.1.2	Faserverstärkte Kunststoffe . . . . .	282
5.5.1.3	Blends und Copolymere . . . . .	287
5.5.2	Anwendung des instrumentierten Schlagzugversuchs zur Erzeugnisbewertung . . . . .	293
5.5.3	Berücksichtigung des Bruchverhaltens bei der Werkstoffauswahl und Dimensionierung . . . . .	297
5.6	Zusammenstellung der Normen . . . . .	299
5.7	Literatur . . . . .	301
<b>6</b>	<b>Prüfung physikalischer Eigenschaften . . . . .</b>	<b>305</b>
6.1	Thermische Eigenschaften . . . . .	305
6.1.1	Einleitung . . . . .	305
6.1.2	Wärmeleitfähigkeitsbestimmung . . . . .	307

6.1.3	Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) .....	312
6.1.4	Thermogravimetrische Analyse (TGA) .....	317
6.1.5	Thermomechanische Analyse (TMA) .....	319
6.2	Optische Eigenschaften .....	323
6.2.1	Einführung .....	323
6.2.2	Reflexion und Brechung .....	324
6.2.2.1	Gerichtete und diffuse Reflexion .....	324
6.2.2.2	Brechzahlbestimmung .....	324
6.2.3	Dispersion .....	329
6.2.4	Polarisation .....	330
6.2.4.1	Optische Aktivität .....	330
6.2.4.2	Polarisationsoptische Bauelemente .....	330
6.2.4.3	Polarisationsoptische Untersuchungsverfahren .....	332
6.2.5	Transmission, Absorption und Reflexion .....	339
6.2.6	Glanz, Innere Remission und Trübung .....	340
6.2.7	Farbe .....	344
6.2.8	Transparenz und Durchsichtigkeit .....	348
6.2.9	Infrarotspektroskopie .....	351
6.2.10	Lasertechnik .....	354
6.2.11	Prüfung auf die Konstanz optischer Werte .....	355
6.3	Elektrische und dielektrische Eigenschaften .....	357
6.3.1	Einleitung .....	357
6.3.2	Physikalische Grundlagen .....	360
6.3.3	Elektrische Leitfähigkeit und Widerstand .....	363
6.3.3.1	Durchgangswiderstand .....	364
6.3.3.2	Oberflächenwiderstand .....	366
6.3.3.3	Isolationswiderstand .....	368
6.3.3.4	Messverfahren .....	368
6.3.3.5	Kontaktierung und Prüfkörpervorbereitung .....	371
6.3.4	Dielektrische Eigenschaften und dielektrische Spektroskopie .....	372
6.3.4.1	Relaxationsprozesse .....	373
6.3.4.2	Wechselstromleitfähigkeit .....	381
6.3.4.3	Breitbandige dielektrische Messtechnik .....	383
6.3.5	Spezielle technische Prüfverfahren .....	390
6.3.5.1	Elektrostatische Aufladung .....	390
6.3.5.2	Elektrische Festigkeit .....	392
6.3.5.3	Kriechstromfestigkeit und Lichtbogenfestigkeit .....	397
6.4	Zusammenstellung der Normen .....	399
6.5	Literatur .....	405
<b>7</b>	<b>Bewertung der Spannungsrisssbeständigkeit</b> .....	<b>411</b>
7.1	Allgemeine Bemerkungen zum Versagen von Kunststoffen in aggressiven Medien .....	411
7.2	Prüfung der Spannungsrisssbeständigkeit .....	415
7.2.1	Prüfmethoden zur Bestimmung der umgebungsbedingten Spannungsrisssbildung .....	415

7.2.2	Beispiele zur Bewertung der Spannungsrisssbeständigkeit mit standardisierten Prüfverfahren	419
7.2.3	Bruchmechanische Prüfmethoden	423
7.3	Modellbetrachtungen zum Versagen von Kunststoffen in Medien durch Spannungsrisse	427
7.4	Einflussgrößen auf das Spannungsrisssverhalten	431
7.4.1	Vernetzung	431
7.4.2	Molmasse und Molmassenverteilung	432
7.4.3	Verzweigungen	434
7.4.4	Kristalline Bereiche	435
7.4.5	Molekülorientierung	436
7.4.6	Physikalisch-chemische Wechselwirkungsvorgänge	439
7.4.7	Viskosität des Umgebungsmediums	445
7.4.8	Einfluss der Prüfkörperdicke	450
7.4.9	Einfluss der Temperatur	452
7.5	Zusammenstellung der Normen und Richtlinien	455
7.6	Literatur	457
<b>8</b>	<b>Zerstörungsfreie Kunststoffprüfung</b>	<b>461</b>
8.1	Einleitung	461
8.2	Zerstörungsfreie Prüfung mit elektromagnetischen Wellen	463
8.2.1	Röntgenstrahlung	463
8.2.1.1	Projektionsverfahren mittels Absorption	464
8.2.1.2	Compton-Rückstreuung	466
8.2.1.3	Röntgen-Refraktometrie	467
8.2.2	Spektralbereich des sichtbaren Lichts	470
8.2.2.1	Dickenmessung an transparenten Bauteilen	470
8.2.2.2	Spannungsoptik an transparenten Bauteilen	470
8.2.2.3	Konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie	471
8.2.2.4	Streifenprojektion zur Konturerfassung	473
8.2.2.5	Interferometrische Verfahren	474
8.2.3	Thermographie	479
8.2.4	Mikrowellen	480
8.2.5	Dielektrische Spektroskopie	484
8.2.6	Wirbelstrom	485
8.3	Zerstörungsfreie Prüfung mit elastischen Wellen	487
8.3.1	Elastische Wellen bei linearem Werkstoffverhalten	488
8.3.1.1	Ultraschall	488
8.3.1.2	Mechanische Vibrometrie	498
8.3.2	Elastische Wellen bei nichtlinearem Werkstoffverhalten	502
8.3.2.1	Grundlegendes zu elastischen Wellen im nichtlinearen Werkstoff	502
8.3.2.2	Nichtlinearer Luftultraschall	503
8.3.2.3	Nichtlineare Vibrometrie	506
8.4	Zerstörungsfreie Prüfung mit dynamischem Wärmetransport	509
8.4.1	Externe Anregung	509

8.4.1.1	Wärmeflussthermographie mit nichtperiodischem Wärmetransport .....	509
8.4.1.2	Thermographie mit periodischem Wärmetransport .....	511
8.4.2	Interne Anregung .....	515
8.4.2.1	Thermographie mit Anregung durch elastische Wellen .....	515
8.4.2.2	Thermographie mit anderen internen Anregungsarten .....	520
8.5	Ausblick .....	520
8.6	Literatur .....	522
<b>9</b>	<b>Hybride Verfahren der Kunststoffdiagnostik .....</b>	<b>529</b>
9.1	Zielstellung .....	529
9.2	Zugversuch, Schallemissionsprüfung und Videothermographie .....	531
9.3	Zugversuch und Laserextensometrie .....	534
9.4	Bruchmechanik und Zerstörungsfreie Prüfung .....	539
9.5	Literatur .....	543
<b>10</b>	<b>Prüfung von Verbundwerkstoffen .....</b>	<b>547</b>
10.1	Einführung .....	547
10.2	Theoretischer Hintergrund .....	549
10.2.1	Anisotropie .....	549
10.2.2	Elastische Eigenschaften von Laminaten .....	550
10.2.3	Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur .....	551
10.2.4	Laminattheorie und Hauptsatz nach <i>St. Venant</i> .....	551
10.2.5	Anwendung Bruchmechanischer Konzepte für FVW .....	552
10.3	Prüfkörperherstellung .....	555
10.3.1	Laminatherstellung .....	555
10.3.2	Prüfkörpervorbereitung für unidirektionale Beanspruchung .....	557
10.4	Bestimmung des Faservolumengehalts .....	558
10.5	Mechanische Prüfmethode(n) .....	560
10.5.1	Zugversuche .....	560
10.5.2	Druckversuche .....	563
10.5.3	Biegeversuche .....	567
10.5.4	Interlaminare Scherfestigkeit .....	570
10.5.5	Schubversuche .....	571
10.5.5.1	$\pm 45^\circ$ Off-Axis Zugversuch .....	571
10.5.5.2	$10^\circ$ Off-Axis Zugversuch .....	573
10.5.5.3	Two- und Three-Rail Scherversuche .....	574
10.5.5.4	<i>Iosipescu</i> Schubversuch .....	575
10.5.5.5	Plate-Twist Schubversuch .....	576
10.5.5.6	Torsion dünnwandiger Rohre .....	577
10.6	Bruchmechanische Prüfmethode(n) .....	579
10.6.1	Experimentelle Prüfung von FVW .....	579
10.6.2	Spezielle Prüfkörperformen .....	580
10.6.2.1	Prüfkörper für Mode I-Beanspruchung .....	580
10.6.2.2	Prüfkörper für Mode II-Beanspruchung .....	581
10.6.2.3	Mixed Mode-Prüfkörper .....	584

10.6.3	Bruchmechanische Kennwerte von FVW .....	587
10.7	Spezifische Prüfmethode .....	588
10.7.1	Edge-Delamination Test (EDT) .....	588
10.7.2	Boeing Open-Hole Compression Prüfung .....	589
10.8	Schälfestigkeit biegeweicher Lamine .....	590
10.9	Schlagbeanspruchung und Schadenstoleranz .....	592
10.10	Zusammenstellung der Normen und Richtlinien .....	596
10.11	Literatur .....	599
<b>11</b>	<b>Technologische Prüfverfahren .....</b>	<b>601</b>
11.1	Wärmeformbeständigkeit .....	601
11.1.1	Grundlagen und Definitionen .....	601
11.1.2	Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur <i>HDT</i> und der <i>Vicat</i> -Erweichungstemperatur .....	602
11.1.3	Anwendungsbeispiele zur Aussagefähigkeit der <i>Vicat</i> - und <i>HDT</i> -Prüfung .....	605
11.2	Brandverhalten .....	609
11.2.1	Einleitung .....	609
11.2.2	Stufen eines Brandes und Brandparameter .....	612
11.2.3	Brandprüfungen .....	614
11.2.3.1	Neigung zu Schwelbrand .....	615
11.2.3.2	Entzündbarkeit .....	616
11.2.3.3	Flammenausbreitung .....	621
11.2.3.4	Wärmefreisetzung .....	624
11.2.3.5	Feuerwiderstand .....	626
11.2.3.6	Löschbarkeit .....	627
11.2.3.7	Rauchentwicklung .....	627
11.2.4	Die Anwendung des Cone-Kalorimeters zur Charakterisierung des Brandverhaltens .....	629
11.3	Bauteilprüfung .....	634
11.3.1	Einführung .....	634
11.3.2	Basisprüfmethode .....	635
11.3.2.1	Allgemeines .....	635
11.3.2.2	Prüfung äußerer Merkmale .....	637
11.3.2.3	Prüfung von Werkstoffeigenschaften .....	638
11.3.2.4	Prüfung der Gebrauchstauglichkeit .....	640
11.3.3	Prüfung von Kunststoffrohren .....	641
11.3.3.1	Qualitätssicherung bei Kunststoffrohren .....	641
11.3.3.2	Prüfung des Zeitstandinnendruckes von Kunststoffrohren .....	643
11.3.4	Prüfung von Kunststoffbauteilen für Anwendungen im Automobilbau ...	646
11.3.4.1	Anforderungen an die Prüfung .....	646
11.3.4.2	Mechanische Prüfungen .....	646
11.3.4.3	Permeations- und Emissionsprüfungen .....	648
11.3.5	Prüfung von Kunststoffbauteilen für Anwendungen im Bauwesen .....	651
11.3.5.1	Einleitung .....	651

11.3.5.2	Prüfung von Sandwichelementen .....	652
11.3.5.3	Prüfung von Kunststoffmantelrohren .....	655
11.4	Implantatprüfung .....	660
11.4.1	Einführung .....	660
11.4.2	Push-out Test an Implantaten .....	662
11.4.3	Prüfung des Einsatzverhaltens von pharyngo-trachealen Stimmprothesen .....	665
11.4.4	Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von humanem Knorpel ...	668
11.5	Zusammenstellung der Normen .....	671
11.6	Literatur .....	675
<b>12</b>	<b>Mikroprüftechnik .....</b>	<b>679</b>
12.1	Einführung .....	679
12.2	Kennwertermittlung an Mikroprüfkörpern .....	683
12.2.1	Mikrozugprüfung .....	683
12.2.2	Bruchmechanische Untersuchungen mit Hilfe von miniaturisierten Compact Tension (CT)-Prüfkörpern .....	687
12.3	Nano-Eindringprüfung .....	690
12.4	Prüfmethoden auf dem Weg in die Nanowelt .....	692
12.4.1	Berührungslose Verschiebungsfeldbestimmung durch digitale Bildkorrelation (Grauwertkorrelationsanalyse) .....	692
12.4.2	In-situ-Deformationsmessungen im Atomkraftmikroskop (AFM) .....	694
12.5	Literatur .....	699
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>701</b>

# Vorwort zur 3. Auflage

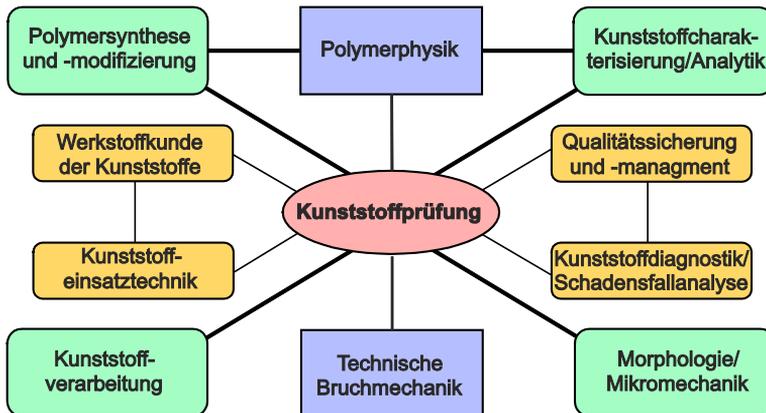
Die vorliegende 3. Auflage des Lehrbuches „*Kunststoffprüfung*“ berücksichtigt die von Fachkollegen in den zahlreichen, sehr positiven Rezensionen gegebenen Hinweise und Änderungswünsche. Darüber hinaus wurden alle Kapitel durch die Herausgeber und Mitautoren kritisch durchgesehen. Die in Kapitel 1 gegebenen Literaturhinweise für die einzelnen Fachgebiete wurden durch neu herausgegebene Lehr- und Fachbücher ergänzt. Auf dem Gebiet der nationalen und internationalen Normung und Standardisierung haben sich zahlreiche Veränderungen vollzogen, die zu insgesamt mehr als 400 Aktualisierungen mit Stand vom März 2015 geführt haben. Die vom Carl Hanser Verlag auf Anfrage erhältlichen Powerpoint-Folien der Bilder und Tabellen wurden ebenfalls überarbeitet und können im Lehrbetrieb an Universitäten und Hochschulen eingesetzt werden.

Eine weitere Informationsmöglichkeit zur Erläuterung von Begriffen und der praktischen Durchführung von Prüfmethoden der Kunststoffprüfung bietet das Lexikon zur „Kunststoffprüfung und Diagnostik“. Dieses Online-Lexikon nutzt das von der Wikipedia-Enzyklopädie her bekannte Wiki-System und ist unter [www.psm-merseburg.de](http://www.psm-merseburg.de) in der Version 4.0 (2014) frei verfügbar. Die wissenschaftliche Basis für dieses Wiki-Lexikon bilden die in der Merseburger Schule (siehe auch [www.amk-merseburg.de](http://www.amk-merseburg.de)) publizierten Lehr- und Fachbücher zur Kunststoffprüfung und Diagnostik sowie zur technischen Bruchmechanik von Kunststoffen und Verbundwerkstoffen mit polymerer Matrix.

Das Buch wurde in dem neuen Layoutprogramm ADOBE InDesign gestaltet, wodurch sich die äußere Ansicht des Buches sehr stark geändert hat. Für die dabei geleistete Unterstützung danken wir dem Carl Hanser Verlag, insbesondere Herrn Dr. Mark Smith, Frau Dipl.-Ing. (FH) Ulrike Wittmann und Herrn Jörg Strohbach.

*Sabine Seidler, Wien*  
März 2015

*Wolfgang Grellmann, Halle und Merseburg*



**Bild 1.1** Der interdisziplinäre Charakter der Kunststoffprüfung

Um die wachsenden Ansprüche an die Zuverlässigkeit, Sicherheit und Lebensdauer von Maschinen, Anlagen und Bauteilen zu erfüllen und den Bruch als eine der häufigsten werkstoffseitigen Versagensursachen von Kunststoffen auszuschließen, ist die Einbeziehung von Messmethoden zur Bewertung der Brucheigenschaften erforderlich. Dazu werden die Methoden der *Technischen Bruchmechanik* verwendet. Der Stand der Forschung hierzu wird z.B. in Kapitel 5 für Kunststoffe und in Kapitel 10 für die Verbundwerkstoffe vermittelt. Innerhalb der Polymerwissenschaften haben sich als eigenständige Wissensgebiete die *Werkstoffkunde der Kunststoffe* und die *Kunststoffeinsatztechnik* fest etabliert, wie man auch aus Studienplänen kunststofftechnischer Studienrichtungen sowie den am Ende des Kapitels gegebenen Literaturhinweisen für die einzelnen Fachgebiete entnehmen kann. Gegenstand der *Kunststoffeinsatztechnik* ist das Konstruieren mit Kunststoffen, wobei für den Konstrukteur von Erzeugnissen aus Kunststoffen die Aufgabe in zunehmenden Maße darin besteht, die Dimensionierung und Gestaltung mit werkstoffwissenschaftlich begründeten Kenngrößen vorzunehmen. Von zunehmender Bedeutung sind auch die Disziplinen *Qualitätssicherung* und *Qualitätsmanagement*, wobei unter Qualitätsmanagement die Gesamtheit der qualitätsbezogenen Tätigkeiten zu verstehen sind. Ein wesentlicher Bestandteil ist die Qualitätsprüfung, die selbst wiederum in vielfältiger Form erfolgen kann. Ein wichtiger, aber technisch schwierig zu realisierender Schritt besteht in der Inline-Integration von Prüfverfahren der Kunststoffprüfung in den jeweiligen Produktionsprozess zur optimalen Sicherung der Qualitätsanforderungen an das Produkt und den Prozess. Die *Kunststoffdiagnostik/Schadensfallanalyse* beinhaltet das Zusammenwirken von Methoden zur Untersuchung der stofflichen Zusammensetzung (*Analytik*), des strukturellen Aufbaus, der mechanischen, thermischen, elektrischen und optischen Eigenschaften sowie der Reaktion mit der Umgebung. Schwerpunktmäßig dargestellt werden in Kapitel 9 hybride Methoden der Kunststoffdiagnostik, worunter die In-situ-Kopplung von mechanischen und bruchmechanischen Experimenten mit zerstörungsfreien

Prüfmethoden, wie z. B. der Schallemissionsanalyse (SEA), der Thermographie oder der Laserextensometrie verstanden wird. Ziel ist immer die Erhöhung der Aussagefähigkeit klassischer Prüfmethoden und die Ableitung von Möglichkeiten zur Quantifizierung von Schädigungszuständen bzw. -grenzwerten.

## ■ 1.2 Einflussgrößen auf die Kennwertermittlung

In Kunststoffen hat die Verarbeitung einen wesentlichen Einfluss auf die Struktur- und damit auf die daraus resultierenden Eigenschaften. Diese ausgeprägte Verarbeitungsempfindlichkeit ist eine wesentliche Ursache für die begrenzte Aussagefähigkeit von Kenngrößen für Kunststoffe. Demzufolge sind der innere Aufbau des polymeren Festkörpers und die ihn beschreibenden Eigenschaften nicht allein von der chemischen Zusammensetzung abhängig.

Die Problematik der Kennwertermittlung besteht darin, dass nicht die Eigenschaft des zu prüfenden Werkstoffes (Formmasse) erfasst wird, sondern die Eigenschaft eines aus diesem Werkstoff hergestellten Prüfkörpers in einem durch den Verarbeitungsprozess bedingtem Zustand. Damit ist eine Übertragbarkeit von Kennwerten, ermittelt an Prüfkörpern oder Bauteilen vorgegebener Geometrie auf Bauteile mit anderer Geometrie auf Grund verschiedener innerer Zustände nicht von vornherein gewährleistet. Die Einflussgrößen sind in Kapitel 2 zur Prüfkörperherstellung ausführlich zusammengestellt. Zu den wichtigsten gehören neben der Formmasse selbst die mit der Prüfkörperherstellung verbundenen Einflüsse, die Prüfkörpergeometrie und die Prüfbedingungen. Bei Kunststoffen sind das im Wesentlichen die Prüftemperatur, die Prüfgeschwindigkeit und Umgebungseinflüsse, im einfachsten Fall die Luftfeuchtigkeit. Auf Grund der Vielzahl von Einflussgrößen auf das Prüfergebnis können Kennwerte an Kunststoffen nur dann reproduzierbar gemessen werden, wenn sie auf der Grundlage vergleichbarer chemischer und physikalischer Struktur, gleicher geometrischer Bedingungen und gleicher Prüfmethoden ermittelt werden. Die Kennwertermittlung muss deshalb immer strukturbezogen erfolgen. Die besondere Spezifik besteht darin, dass diese Einflussgrößen nicht einzeln wirken, sondern dass von einer komplexen Funktionalität der aufgeführten Parameter auszugehen ist. Daraus folgt, dass sowohl die quantitative Erfassung jeder einzelnen Randbedingung als auch ihres komplexen Zusammenwirkens für die umfassende Eigenschaftsbewertung von Bedeutung ist. Die Bewertung erfolgt mit Kennwerten auf der Basis genormter Prüfmethoden, die die Vergleichbarkeit garantieren und damit die Klassifizierung typengerechter Produkte gewährleisten. Die Kenntnis der grundlegenden Wissenszusammenhänge bei der Eigenschaftsbildung und deren Beschreibung mit Kennwerten ist immer an eine hierarchische Betrachtungsweise von molekularer Struktur und Morphologieausbildung im Verarbeitungsprozess gebunden.

- die Festigkeit verringert sich mit höherer Feuchte, zunehmender Alterung, Degradation oder Entmischung, die Verformungsfähigkeit hingegen kann, bedingt durch die unterschiedlichen Deformationsprozesse, zu- oder abnehmen,

wobei diese Aussagen werkstoffabhängig und nicht verallgemeinerungsfähig sind, wie z. B. positive Nachkristallisationseffekte infolge Alterung zeigen.

Infolge der dargestellten Zusammenhänge zwischen Struktur und Eigenschaften wird deutlich, dass Kennwerte, die an genormten Prüfkörpern ermittelt wurden, nicht unmittelbar auf Kunststoffbauteile übertragbar sind.

Die wichtigsten und in der Praxis am bedeutsamsten mechanischen Versuche sind der Zugversuch, der Biegeversuch und der Druckversuch sowie der für Folien relevante Weiterreißversuch, wogegen die Torsionsbeanspruchung bei Kunststoffen nur eine geringe Bedeutung besitzt. Neben diesen Grundversuchen existieren verschiedene Prüfverfahren, die auf vergleichbarer Messtechnik basieren und insbesondere der Charakterisierung von Fügeverbindungen (Klebungen und Schweißnähte), Bestimmung der Haftfestigkeit und der interlaminaeren Scherfestigkeit dienen. Dies sind der Zug- und Biegescherversuch [4.45] und der Schälversuch, der auch als Peel-Test bekannt ist [4.46] (s. Kapitel 10).

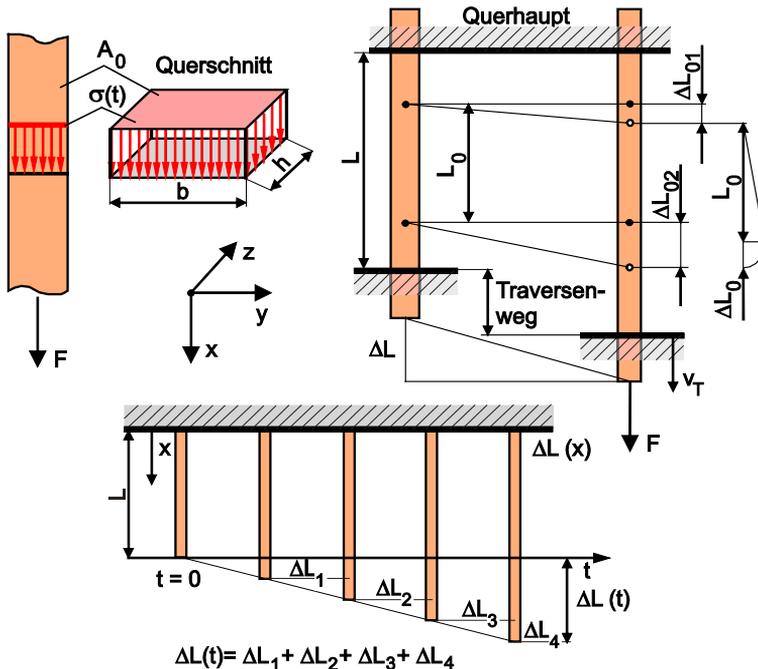
## 4.3.2 Zugversuch an Kunststoffen

### 4.3.2.1 Theoretische Grundlagen des Zugversuches

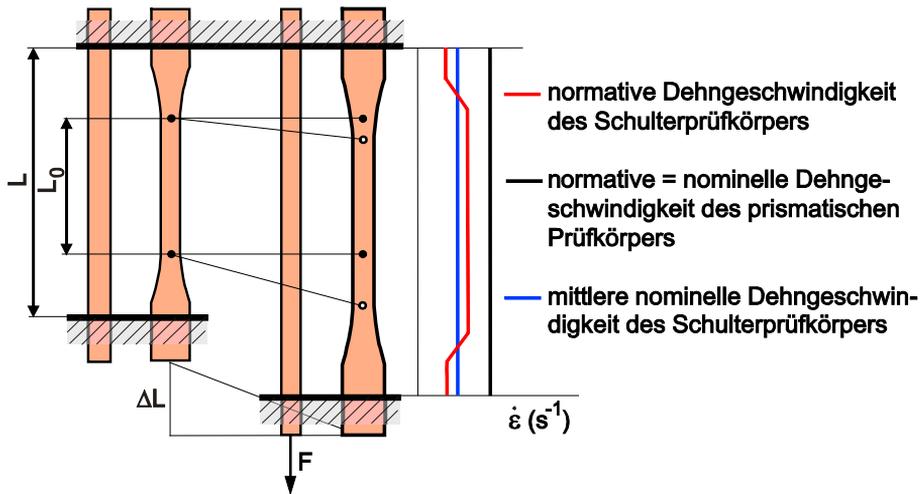
Der Zugversuch gilt unter den statischen bzw. quasistatischen Prüf- und Messverfahren als der Grundversuch der mechanischen Werkstoffprüfung. Trotz des Sachverhaltes, dass eine reine Zugbeanspruchung in der Praxis eher die Ausnahme darstellt und experimentelle als auch interpretative Probleme existieren, nimmt dieser Versuch auch in der Kunststoffprüfung eine Vorrangstellung ein. Infolge der großen Vielfalt gegebener Modifikationsmöglichkeiten bei den Kunststoffen sind verschiedene Ausführungsvarianten des Zugversuches bekannt, die differierende Prüfkörper, Belastungsbedingungen oder Einspannvorrichtungen bedingen. Zielstellung für die Praxis sind vergleichsweise einfach zu messende, aussagekräftige Werkstoffkenngrößen, die zur Beurteilung der Eigenschaften für die Qualitätssicherung, Werkstoffauswahl und einfache Dimensionierungsaufgaben genutzt werden können. Daraus ergeben sich folgende Haupteinsatzgebiete in der Kunststoffprüfung sind:

- Ermittlung der Zugeigenschaften von thermo- und duroplastischen Form- und Extrusionsmassen,
- Charakterisierung der Zugeigenschaften von Kunststofffolien und Tafeln und
- Ermittlung der Eigenschaften von isotropen und anisotropen faserverstärkten Kunststoffverbunden.

Der konventionelle Zugversuch, d.h. der Zugversuch mit konstanter Traversengeschwindigkeit, stellt als quasistatischer Versuch grundlegende Voraussetzungen an die verwendete Prüftechnik und -bedingungen sowie die genutzten Prüfkörper. Die Lastaufbringung muss stoßfrei erfolgen und die Lastzunahme erfolgt stetig steigend und langsam zunehmend bis zum Bruch des Prüfkörpers. In dem Prüfkörper soll ein einachsiger Last- und Spannungszustand erzeugt werden, d.h. in hinreichender Entfernung von der oberen und unteren Einspannung existiert ein homogener uniaxialer Spannungszustand ohne Einfluss der *Hertz'schen* Pressung, wodurch eine homogene, gleichmäßig über den Querschnitt verteilte Normalspannung und -dehnung entsteht (Bild 4.24). Hinsichtlich des Prüfkörpers wird ein homogener, isotroper Werkstoffzustand angenommen. Es treten keine geometrischen Imperfektionen (z.B. Kerben oder Schultern) auf, die Prüfkörper sind prismatisch. Einflüsse der Prüftechnik, z.B. durch die Nachgiebigkeit oder Compliance der Universalprüfmaschine, die lastseitig durch Setzbewegungen oder dehnungsseitig durch Rutschen der Aufnehmer verursacht werden können, müssen vermieden werden. Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich die Gesamtverformung  $\Delta L_g$  des prismatischen Prüfkörpers zu einem beliebigen Zeitpunkt als Summe der Verlängerung äquidistanter Abschnitte des Prüfkörpers  $\Delta L_i(x)$  (Bild 4.24) und ist damit mit dem Traversenweg identisch.



**Bild 4.24** Zeitliches und örtliches Verformungsverhalten im Zugversuch

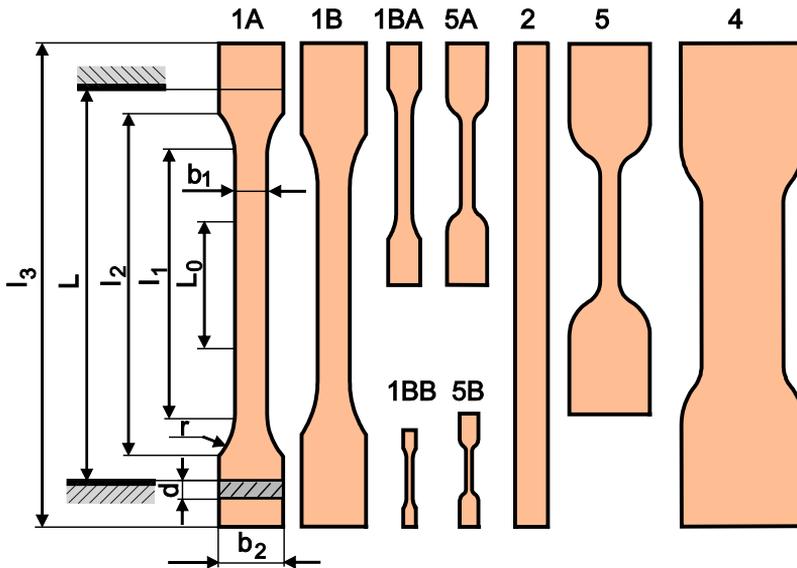


**Bild 4.25** Vergleich der Dehngeschwindigkeiten des Schulterprüfkörpers und des prismatischen Prüfkörpers

Werkstoffen sollten vergleichbare Vielpunktkenwerte (DIN EN ISO 11403) verwendet werden, welche die Eigenschaften in Abhängigkeit von wesentlichen Einflussgrößen wie Temperatur, Zeit und Umgebungsbedingungen als Funktionen darstellen.

#### 4.3.2.2 Der konventionelle Zugversuch

Für die Durchführung des Zugversuchs an Kunststoffen stellt die DIN EN ISO 527 die bevorzugte Norm dar, welche die Prüfung von Formmassen, Folien und Tafeln sowie Faserverbundwerkstoffen umfasst. Eine wesentliche experimentelle Grundvoraussetzung zur Durchführung dieses Versuches ist die Nutzung geeigneter kunststoffgerechter Prüfkörper, die im Bild 4.26 dargestellt sind. Die Prüfkörper des Typs 1A und 1B sind Basisprüfkörper entsprechend DIN EN ISO 3167, die für eine Vielzahl von Untersuchungsmethoden der Kunststoffprüfung eingesetzt werden können (s. Tabelle 4.2). Der Prüfkörper 1A, der in der Regel durch direkte Formgebung wie Spritzgießen hergestellt wird, besitzt eine parallele Länge  $l_1 = 80$  mm und wird auch als Vielzweckprüfkörper bezeichnet. Auf Grund der parallelen Länge kann dieser bevorzugte Prüfkörper auch für andere Prüfverfahren wie Biegeversuch, Druckversuch und Schlagversuch verwendet werden, wobei der Vorteil eines vergleichbaren inneren Zustandes besteht. Der Prüfkörper Typ 1B wird normalerweise durch indirekte Formgebung wie Sägen und Fräsen aus plattenförmigen Halbzeugen hergestellt. Die Varianten 1BA und 1BB sind proportionale Verkleinerungen des Typs 1B im Maßstab 1 : 2 bzw. 1 : 5 und sind damit auch zur Charakterisierung der Zugeigenschaften von aus Bauteilen entnommenen Prüfkörpern verwendbar.



**Bild 4.26** Prüfkörper für den Zugversuch an Kunststoffen nach DIN EN ISO 527

Die Prüfkörper 5A und 5B entsprechen den Typen 2 bzw. 4 der ISO/DIS 37 und sind vorzugsweise für Zugversuche an Gummi und anderen elastomeren Werkstoffen zu verwenden. Die Prüfkörper 2 und 4 werden entsprechend DIN EN ISO 527-3 für die Charakterisierung der Zugeigenschaften von Folien und Tafeln empfohlen, wogegen Typ 5, auch als Löffelstab bezeichnet, für die Prüfung duktiler Werkstoffe mit hoher Bruchdehnung (PE) zu bevorzugen ist. Für faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe sollten Typ 2 oder der ähnliche Typ 3 wahlweise mit Zentrierlöchern oder Aufleimern (Krafteinleitungsplatten) zur Sicherung hinreichender Klemmbedingungen nach DIN EN ISO 527-4 verwendet werden (vgl. Kapitel 10).

**Tabelle 4.2** Prüfkörper Typ 1A und 1B

Prüfkörper Typ		1A	1B
		<b>Maße in mm</b>	
$l_3$	Gesamtlänge	$\geq 150$	
$l_1$	Länge des schmalen parallelen Teils	$80 \pm 2$	$60 \pm 0,5$
$r$	Radius	$20 - 25$	$\geq 60$
$l_2$	Entfernung zwischen den breiten parallelen Teilen	$104 - 113$	$106 - 120$
$b_2$	Breite an den Enden	$20,0 \pm 0,2$	
$b_1$	Breite des engen Teils	$10,0 \pm 0,2$	
$h$	Dicke	$4,0 \pm 0,2$	
$L_0$	Messlänge	$50,0 \pm 0,5$	
$L$	Anfangsabstand der Klemmen	$115 \pm 1$	$l_2$

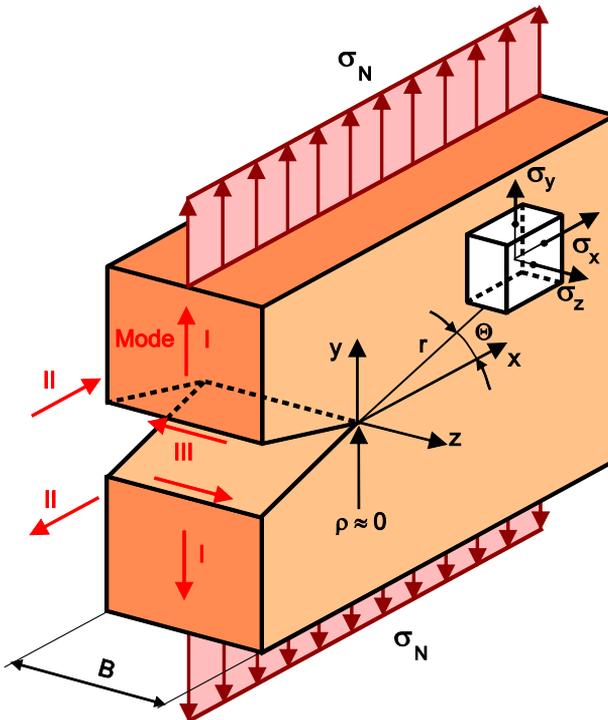
## ■ 5.3 Grundaussagen bruchmechanischer Konzepte

### 5.3.1 Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM)

Die Bruchmechanik geht davon aus, dass der Bruch eines Bauteils und damit des Werkstoffes infolge der Ausbreitung von Anrissen auftritt. Sie untersucht die Bedingungen für die Ausbreitung von Rissen und gestattet es, zwischen der äußeren Beanspruchung, d. h. der am Bauteil oder Prüfkörper wirkenden Nennspannung, der Größe und Form der Anrisse sowie dem Widerstand des Werkstoffes gegen Rissausbreitung quantitative Zusammenhänge herzustellen. Das LEBM-Konzept beschreibt den Spannungszustand in der Nähe der Risspitze durch den Spannungsintensitätsfaktor  $K$  (Bild 5.1):

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{(2\pi r)^{1/2}} g_{ij}(\Theta) \quad (5.1)$$

$\sigma_{ij}$  Normal- bzw. Schubspannungen  
 $r, \Theta$  Polarkoordinaten mit der Risspitze als Ursprung  
 $g_{ij}$  dimensionslose Funktion



**Bild 5.1**  
 Koordinatensystem zur  
 Beschreibung des Spannungszustandes an der Risspitze

Der von *Irwin* [5.12] eingeführte Spannungsintensitätsfaktor ist gegeben durch:

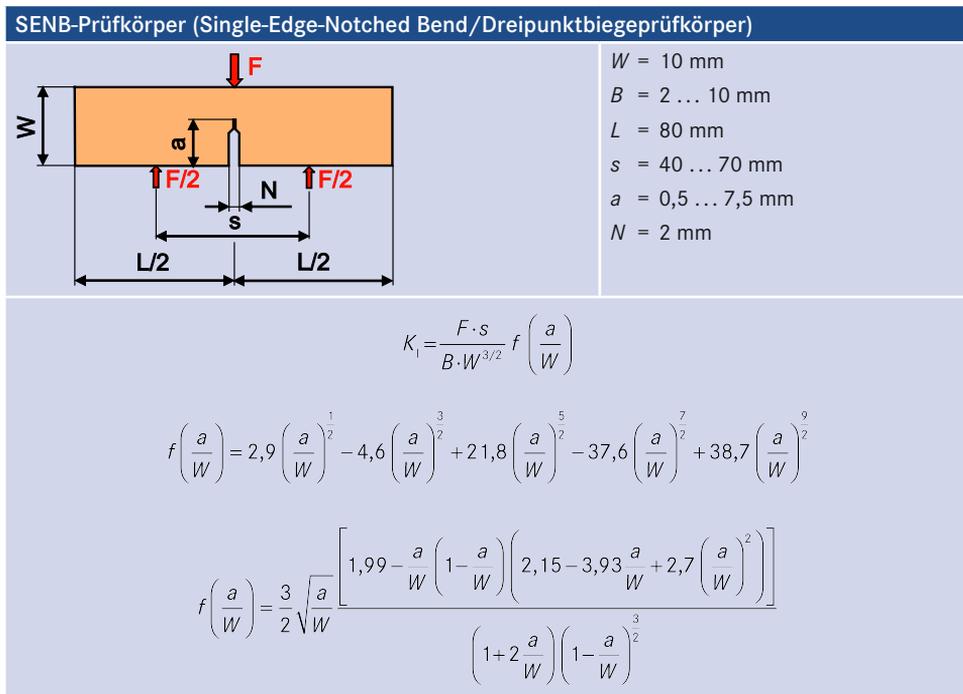
$$K = \sigma_N (\pi a)^{1/2} \quad (5.2)$$

$\sigma_N$  Nennspannung  
 $a$  Risslänge

Die endliche Geometrie eines jeden Bauteils und Prüfkörpers sowie die Rissgeometrie werden durch die Einführung einer Geometriefunktion  $f(a/W)$  berücksichtigt, womit Gl. 5.2 in der Form:

$$K = \sigma_N (\pi a)^{1/2} f(a/W) \quad (5.3)$$

geschrieben werden kann. Die Funktionen  $f(a/W)$  sind für eine Vielzahl bruchmechanischer Prüfkörper berechnet worden [1.40, 1.44, 5.13]. Bild 5.2 enthält die Abmessungen von bevorzugt für Kunststoffe angewandten Prüfkörpern. Für einen unendlich ausgedehnten Prüfkörper und den Grenzfall eines Risses mit einem Kerbradius  $\rho \sim 0$  ist  $f(a/W) = 1$ .



**Bild 5.2** Zusammenstellung häufig verwendeter Prüfkörperformen mit ihren Abmessungen, den dazugehörigen Bestimmungsgleichungen zur Berechnung der Bruchzähigkeiten und den Geometriefunktionen

### 5.3.3 $J$ -Integral-Konzept

Das von *Cherepanov* [5.17] und *Rice* [5.18] eingeführte  $J$ -Integral hat auf Grund der energetischen Betrachtung des Bruchvorganges für Kunststoffe die größte Bedeutung erlangt. Das wegunabhängige Linienintegral umschließt den plastisch deformierten Bereich und verläuft im elastisch deformierten Bereich mit geschlossenem Integrationsweg um die Risspitze (Bild 5.9a). Die  $x$ - und  $y$ -Komponenten werden definiert durch:

$$J_x = \int_R \left( W dy - T_{ij} \cdot n_j \frac{\partial u}{\partial x} dR \right) \quad \text{und} \quad (5.12)$$

$$J_y = \int_R \left( -W dx - T_{ij} \cdot n_j \frac{\partial u}{\partial x} dR \right) \quad (5.13)$$

- $W$  elastische Energiedichte  
 $T$  Spannungstensor  
 $n$  Außennormale der Kurve  $R$  um die Risspitze  
 $u$  Verschiebungsvektor

Die experimentelle Bestimmung erfolgt nach Bild 5.9b bis d, indem aus den registrierten Kraft-Kraftangriffspunktverschiebungs-Kurven mit unterschiedlichen Kerbtiefen durch Planimetrieren die Verformungsenergie  $A_G$  ermittelt und das Verhältnis  $A_G/B$  in Abhängigkeit von  $a$  dargestellt wird.

Durch grafische Differentiation ergibt sich:

$$J = \frac{1}{B} \frac{\partial A_G}{\partial a} \quad (5.14)$$

als Funktion der Kraftangriffspunktverschiebung bzw. Durchbiegung.

Da der Aufwand zur Bestimmung von  $J$ -Werten nach dieser Prozedur für die praktische Kennwertermittlung zu hoch ist, wurden Näherungsformeln entwickelt (s. Abschnitt 5.4.2.4).

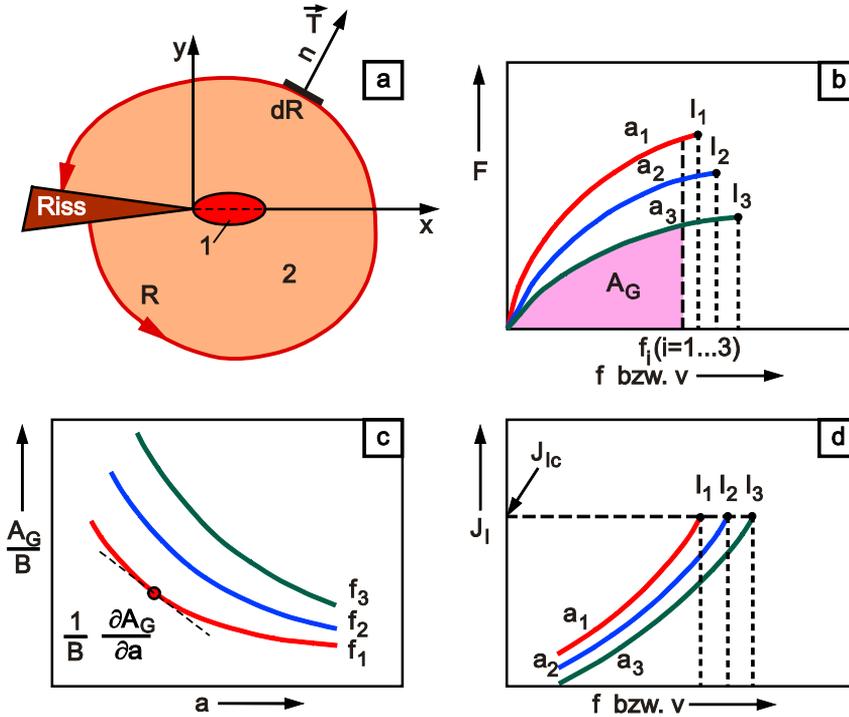
Für elastisches Werkstoffverhalten ist das  $J$ -Integral mit der Energiefreisetzungsrates  $G$  identisch:

$$J_1 = G_1 = \frac{K_1^2}{E} \quad \text{für ESZ} \quad (5.15)$$

bzw.

$$J_1 = G_1 = \frac{K_1^2}{E} (1 - \nu^2) \quad \text{für EDZ} \quad (5.16)$$

Diese Gleichungen sind für die Umrechnung von  $J_{Ic}$ -Werten in  $K_{Ic}^J$ -Werte anzuwenden.



**Bild 5.9** Bestimmung des  $J$ -Integrals: wegunabhängiges Linienintegral mit 1 plastisch deformierter Bereich (energie-dissipative Zone) und 2 elastisch deformierter Bereich (a), experimentell ermittelte Kraft-Kraftangriffspunktverschiebungs-Kurven unterschiedlicher Risslänge (b), durch Planimetrieren der  $F = f(v, f)$ -Abhängigkeit ermittelte Energie, bezogen auf die Prüfkörperdicke als Funktion der Risslänge (c) und durch Differenzieren der Kurven (c) bestimmtes  $J$ -Integral (d)

Den Zusammenhang zwischen  $J$ -Integral- und CTOD-Konzept liefert:

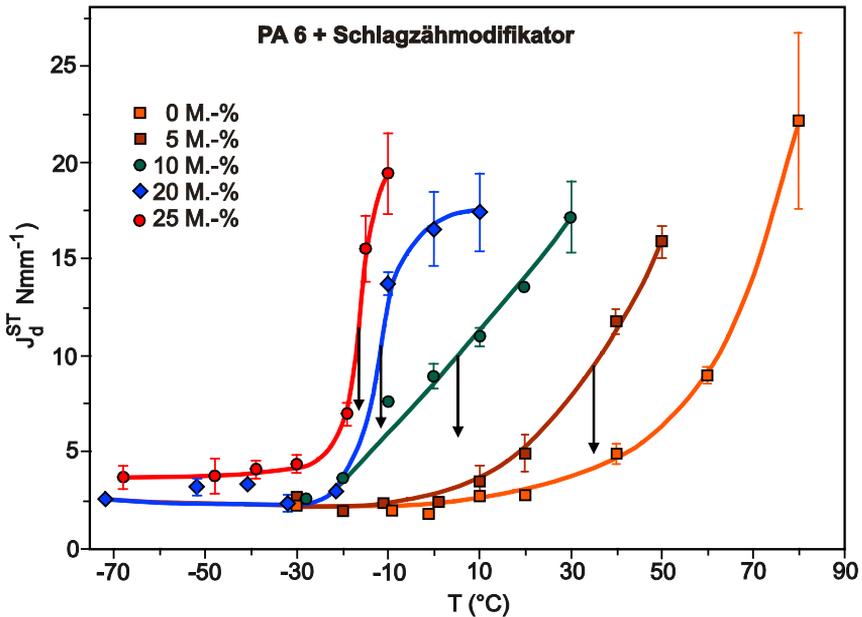
$$J = m \cdot \sigma_y \cdot \delta_{Ic} \quad (5.17)$$

worin  $m$  nach [1.39, 1.40] als Constraint-Faktor bezeichnet wird. Die kritischen  $J$ -Werte sind geometrieunabhängig, d.h. echte Werkstoffkennwerte, wenn das Kriterium:

$$B, a, (W - a) \geq \varepsilon \frac{J}{\sigma_y} \quad (5.18)$$

$\varepsilon$  werkstoffabhängige Konstante des Geometrikriteriums des  $J$ -Integral-Konzeptes

erfüllt ist.



**Bild 5.24** Temperaturabhängigkeit der  $J$ -Werte von schlagzähmodifiziertem PA 6; die Pfeile kennzeichnen die Spröd-Zäh-Übergangstemperaturen

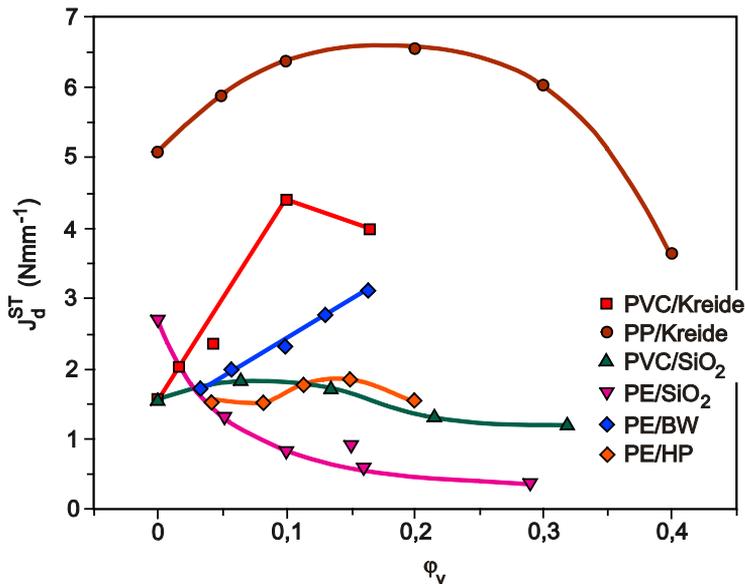
## ■ 5.5 Anwendungen in der Werkstoffentwicklung

### 5.5.1 Bruchmechanische Zähigkeitsbewertung von modifizierten Kunststoffen

#### 5.5.1.1 Teilchengefüllte Kunststoffe

Die Modifizierung von Kunststoffen mit anorganischen Zusatzstoffen wie Kreide, Talkum und Glaskugeln, führt in vielen Fällen zu Verbundwerkstoffen mit veränderten mechanischen Eigenschaften. Infolge der differenzierten Beeinflussung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, des Auftretens von elastischen und plastischen Verformungsanteilen, stabilem Risswachstum und Rissverzögerungsenergieanteilen ist die Risszähigkeit als Widerstand gegenüber instabiler und stabiler Rissausbreitung bei schlagartiger Beanspruchung von besonderem Interesse. Das erreichbare mechanische Kennwertniveau ist von der Art, dem Volumenanteil und der Morphologie des Füllstoffes, den Eigenschaften der Matrix sowie den Füllstoff-Matrix-Wechselwirkungen abhängig.

In Bild 5.25 wird die Abhängigkeit der  $J$ -Werte nach Gl. 5.27 vom Füllstoffvolumenanteil  $\varphi_v$  für kreidegefülltes PP, baumwoll- (BW), hartpapier- (HP) bzw.  $\text{SiO}_2$ -gefülltes PE-HD sowie für kreide- und  $\text{SiO}_2$ -gefülltes PVC dargestellt. Dabei zeigt sich ein charakteristisches Maximum für bestimmte  $\varphi_v$ . Zur Aufklärung der Ursachen der Konzentrationsabhängigkeit ist der spezifische Verlauf der einzelnen Messgrößen von Schlagkraft und Durchbiegung in Abhängigkeit von  $\varphi_v$  von entscheidender Bedeutung. Aus Bild 5.26 wird deutlich, dass für die teilchengefüllten Polyolefine dieses Maximum durch die Füllstoffvolumenabhängigkeit von  $F_{\max}$  und für PVC/Kreide bzw. PVC/ $\text{SiO}_2$  durch die Füllstoffvolumenabhängigkeit von  $f_{\max}$  bestimmt wird. Baumwoll- und hartpapiergefülltes PE-HD zeigen ein tendenziell unterschiedliches Verhalten. Während bei den PE/BW-Verbunden im untersuchten Konzentrationsbereich  $F_{\max}$  und  $f_{\max}$  gleichsinnig zunehmen, tritt bei den PE/HP-Verbunden gegenläufiges Verhalten auf. Die resultierenden  $J_{\text{Id}}^{\text{ST}}$ -Werte zeigen demzufolge einen Zähigkeitsanstieg mit zunehmendem Baumwollanteil und ein Maximum in Abhängigkeit vom Faservolumenanteil Hartpapier, das sowohl durch das Maximum in der Abhängigkeit der Bruchkraft als auch durch die zunehmende Verformungsbehinderung geprägt wird. Die Lage des Zähigkeitsmaximums ist vom Matrixwerkstoff abhängig.



**Bild 5.25** Abhängigkeit der  $J$ -Werte vom Füllstoffvolumenanteil  $\varphi_v$  für thermoplastische Verbundwerkstoffe

Weisen die Prüfkörper Orientierungen auf, so können diese zu Dichroismus führen. Die Richtung dieser Orientierungen ist im Messgerät zu definieren und reproduzierbar festzulegen. Werden die Messungen an vollständig opaken Prüfkörpern durchgeführt, wird die Aufsichtfarbestimmung angewendet. Wendet man dieses Verfahren bei transluzenten Prüfkörpern an, ergeben sich in Abhängigkeit von der gewählten Unterlage Farbverfälschungen. In diesem Fall können zwei Verfahren angewendet werden:

1. Erfassung der Farbwerte auf einem glatten, weißen Untergrund unter Verwendung eines Kontaktmittels und
2. Erfassung der Farbwerte ohne optischen Kontakt einer Flüssigkeit auf einer rauen Oberfläche.

Transparente, nicht zu stark streuende Prüfkörper werden im Durchlicht, stark streuende im Aufsichtmodus mit weißem oder schwarzem Untergrund sowohl mit, als auch ohne Kontaktmittel gemessen.

Pulver, Körner oder Fasern werden in Schalen gepresst und danach erfolgt die Farbermittlung. Die Farbwerte von Flüssigkeiten werden in Küvetten bestimmt. Problematisch sind die Glasabdeckungen von festen, porösen oder flüssigen Proben. Die Höhe der entstehenden Messwertverfälschung hängt von der Glasdicke, der Eigenabsorption und der Brechzahl des Abdeckmaterials ab. Weitere Fehler ergeben sich aus dem oft nicht definierten optischen Kontakt zwischen Probe und Abdeckung.

Weitere Informationen zur Farbmessung, zu Farbmessgeräten sowie zur Farbrezeptberechnung wurden von *Kämpf* in [1.7] zusammenfassend dargestellt.

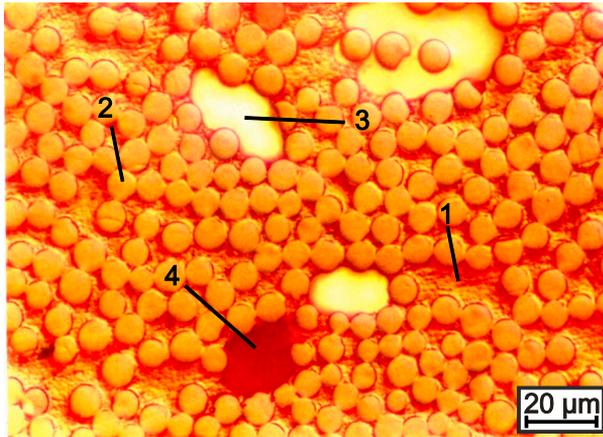
### **Farbestimmung an gefüllten Kunststoffen und Kunststoffmischungen**

Besonders bei mehrphasigen Prüfkörpern können die einzelnen Gefügebestandteile oft nur über unterschiedliche Farben zugeordnet werden. Zur Prüfung der optischen Eigenschaften gefüllter und verstärkter Kunststoffe stehen sowohl aus werkstoffwissenschaftlicher als auch anwendungstechnischer Sicht folgende Gefügemerkmale im Mittelpunkt des Interesses:

- Orientierung der Füll- und Verstärkungsstoffe,
- Füllstoff- bzw. Faserverteilung und Agglomeratbildung sowie
- Einfluss auf die Gefügebildung in der Matrix.

Dazu werden unterschiedliche Methoden der Lichtmikroskopie herangezogen [6.30]. Beispielhaft werden in Bild 6.30 Fehler in der Glasfaserverteilung in einem gefärbten EP-Harz gezeigt, die durch einen Anschliff senkrecht zur Faserorientierungsrichtung sichtbar gemacht wurden.

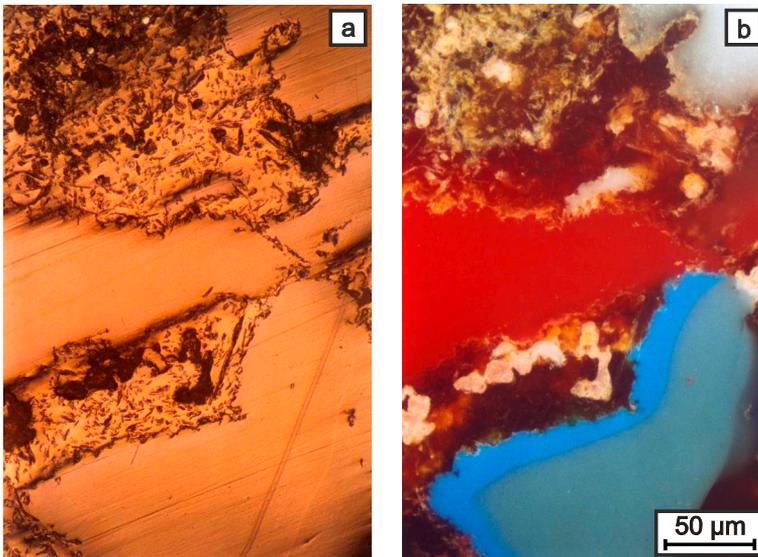
Hier wird durch die Eigenfarbe des Matrixmaterials und die angewendete Dunkel-feldbeleuchtung des Mikroskops eine gute Kontrastierung erreicht.



**Bild 6.30** Gefüge eines EP/GF-Verbundes senkrecht zur Faserorientierung, ermittelt im Auflicht bei Dunkelfeldbeleuchtung (1 Matrix, 2 Glasfaser, 3 Fremdeinschlüsse, 4 Lunker)

Bei Untersuchungen im Auflicht mit Hellfeldbeleuchtung werden durch die Änderung der spektralen Zusammensetzung des zur Beleuchtung verwendeten Lichtes im Mikroskop grundsätzlich nicht die tatsächlichen Farben der Prüfkörperbestandteile widergegeben.

Im Dunkelfeld erfolgt die Beleuchtung über Oberflächenspiegel, welche keine spektrale Änderung des Lichtes hervorrufen. Damit werden im mikroskopischen Bild die wahren Objektfarben dargestellt Bild 6.31a und b zeigen am Beispiel eines



**Bild 6.31** Anschliff eines holzmehlgefüllten Polyolefinmaterials im Auflicht bei Hellfeld- (a) und Dunkelfeldbeleuchtung (b)

# 10

## Prüfung von Verbundwerkstoffen

### ■ 10.1 Einführung

Faserverbundwerkstoffe (FVW) bestehen aus Fasern und Matrix. Die Fasern dienen zur Verstärkung der Matrix. Im Falle von polymeren FVW kann die Matrix aus einem thermoplastischen oder duroplastischen Kunststoff bestehen. Die mechanischen Eigenschaften sind in erster Linie von dem Matrixmaterial, der Faserart und dem Faservolumengehalt abhängig. Die Vorteile der FVW gegenüber konventionellen Werkstoffen liegen in der erhöhten Funktionalität, die auf der Kombination von Fasern und Matrix und deren Struktur beruht.

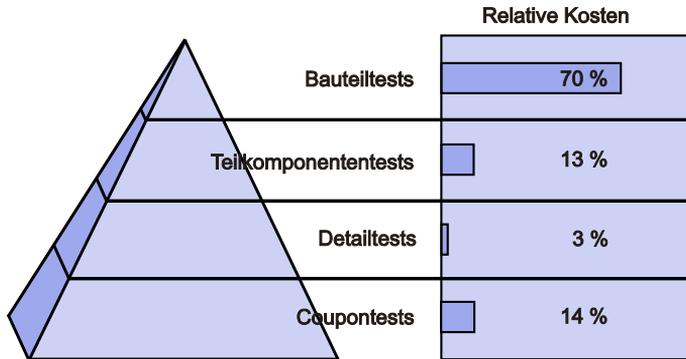
Die Eigenschaftswerte der Verstärkungs- und Matrixwerkstoffe setzen sich in den wenigsten Fällen additiv zusammen. Da FVW einen heterogenen Aufbau besitzen, sind bei einer äußeren Belastung die Spannungen und Dehnungen orts- und richtungsabhängig. Zur Vereinfachung wird der heterogene Aufbau der FVW durch ein homogenes, anisotropes Kontinuum ersetzt.

Die Anisotropie bedeutet eine Erschwernis bei der Berechnung von Bauteilen aus FVW, so dass spezielle Prüfverfahren nötig sind, gestattet jedoch andererseits durch eine gezielte Anordnung der Fasern eine bessere Anpassung der Werkstoffe an die Hauptbelastungsrichtungen, als dies mit optimalen, isotropen Kunststoffen möglich ist. Um das Leistungspotenzial der Fasern auszunutzen, werden sie unidirektional (UD), d. h. parallel in Schichten zu den Hauptbelastungsrichtungen gelegt. Die unidirektionalen Faserverbundschichten zeigen von allen denkbaren Faseranordnungen den geringsten Anisotropiegrad. Wegen der drei Symmetrieebenen spricht man von einem orthotropen Werkstoff. Isotrope Werkstoffe zeichnen sich durch zwei voneinander unabhängige Werkstoffkonstanten aus. Sind Elastizitätsmodul  $E$  und Querkontraktion  $\nu$  bekannt, so kann der Schubmodul  $G$  berechnet werden. Im orthotropen FVW bestehen diese Abhängigkeiten nicht mehr. Für die Berechnung wird grundsätzlich eine rissfreie Matrix mit optimaler Faser/Matrix-Haftung vorausgesetzt, die kein Gleiten zwischen den Werkstoffkomponenten zulässt.

Aufgrund der Anisotropie der Fasern und den besonderen Anforderungen in den verschiedenen Industriezweigen können konventionelle Prüfverfahren für Kunststoffe

nur bedingt auf FVW übertragen werden. Zusätzlich gibt es Prüfverfahren, die speziell für FVW entwickelt wurden.

Bei der Prüfung von mechanischen Eigenschaften von FVW ist zu berücksichtigen, dass die FVW schon herstellungsbedingt Schäden enthalten können. Für eine ausreichende Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit in der Kennwertermittlung ist daher eine umfassende Qualitätskontrolle der FVW erforderlich.



**Bild 10.1** Zulassungsprüfungen in Abhängigkeit der Prüfkörperanzahl und der relativen Kosten [10.1]

Neben der werkstoffbezogenen Qualitätsprüfung sind für die Zulassung als Bauteil Teilkomponenten- bzw. vollständige Bauteiltests erforderlich. In der Luftfahrtindustrie erfolgt die Zulassung eines neuen Bauteils aus FVW über vier Stufen. Bild 10.1 zeigt die Gegenüberstellung der Zahl der erforderlichen Prüfungen in Form einer Pyramide und der auftretenden relativen Kosten. Von unten nach oben reduziert sich die Anzahl der Prüfkörper von über 1000 auf Coupontestniveau auf ein oder zwei Prüfkörper bei der Bauteilprüfung. Rechts sind die dabei entstehenden relativen Kosten aufgeführt. Auf dem Coupontestniveau werden mit Abstand die meisten Prüfungen durchgeführt, z. B. Zug-, Druck- und Biegeprüfungen im trockenen und feuchten Zustand. Wenn die Werkstoffe den geforderten Anforderungen entsprechen, werden in der nächsten Stufe Detailtests, wie Open-Hole Compression, Edge-Delamination Test (EDT) und Compression After Impact (CAI) Tests durchgeführt, bevor die ersten Teilkomponenten gebaut und geprüft werden. Die Bauteilprüfung, die zu einem neuen Bauteil aus FVW führt, ist die teuerste Prüfung und verbraucht etwa 70 % der Kosten einer Entwicklung.

# Sachwortverzeichnis

## Symbole

$\delta$ - $\Delta$ -Kurven 261, 540

## A

*Abbe*-Refraktometer 325, 329  
Abbildungsschärfe 349  
Abgeschwächte Totalreflexion 352  
A-Bild-Technik 488  
Abrasion 218  
Abrieb 194  
ABS/CF-Verbund 366  
Abschälwinkel 591  
Absorption 339, 462, 464, 520, 628, 634  
Absorptionsgrad 339  
Absorptionskoeffizient 464  
Abstumpfung der Rissspitze 257, 429, 453, 539  
Acrylnitril-Butadien-Styrol 25, 130, 158, 164, 200, 534, 604, 641  
Adhäsion 167, 218, 225, 591  
Admittanz 384, 500  
AFM-Topografie 693, 696  
Akkreditierung 9  
Aktivierungsenergie 51, 330, 429, 454  
Akustische Emission 531, 533, 663, 665  
Akustische Impedanz 487  
Alterung 22, 39, 98, 117, 353, 358, 468, 658  
Alterungsprozess 641  
*Amici-Bertrand*-Linse 336, 354  
Amplitude 99, 105, 268, 330, 386, 462, 501, 506, 511  
Amplitudenreflexionskoeffizient 487  
Anisotrope Faserverbundwerkstoffe 117, 560  
Anisotrope Werkstoffe 143, 154, 196, 199, 329 f., 333, 552  
Anisotropie 34, 196, 323, 354, 482, 547, 549, 552  
Anisotropieänderung 334  
Anisotropiemessung 36, 491  
Anisotropieverhältnisse 333, 335  
Ansatz von *Debye* 307, 376  
Ansetzdehnungsaufnehmer 119, 127, 557  
Ansprechempfindlichkeit 461, 495  
Anstiegszeit der elektronischen Messkette 269

Aramidfasern 220, 555  
*Arrhenius*-Gleichung 51, 88, 93, 109, 380, 454, 641, 658  
Aufheizgeschwindigkeit 602  
Aufladungserscheinung 370, 392  
Auflagerabstand 152, 267, 567, 583  
Aufleimer 30, 122, 557, 563, 572  
Aufschlagimpuls 267, 542  
Ausgangsrisslänge 254, 283  
Ausgasung 306, 648  
Aushärtung 358, 499  
Aushärtungsgrad 639  
Aushärtungsvorgang 306, 484  
Ausziehlänge 429, 432  
Avogadrozahl 379  
Axiale Scherfestigkeit 657f.  
Axiales Versagen 564

## B

*Bagley*-Diagramm 65  
Bandrollenschälversuch 590  
*Barcol*-Härte 195, 201, 639  
*Barus*-Effekt 65  
Basisprüfmethoden 635  
Bauteildefekte 511, 517, 680  
Bauteilfertigung 555  
Bauteilprüfung 137, 193, 450, 548, 634, 646  
B-Bild-Technik 489  
Beanspruchungsgeschwindigkeit 37, 66, 85, 95, 134, 162, 253, 293, 445, 533  
*Becke*-Linie 326  
*Begley* 264  
Belastungs-Deformations-Diagramm (Durchzugtest) 667  
Belastungs-Entlastungs-Kurve 581  
Bell-Telefon-Test 417, 420  
Berstdruckversuch 643, 647  
Berührungslose Dehnungsaufnehmer 184, 262, 473, 531, 539, 557, 684  
Beschleunigungsspannung 464  
Betriebssicherheit 521, 634  
Beugung 324, 474

- Biaxiale Bulge-Prüfung 682  
 Biegebeanspruchung 147, 155, 182, 191, 272, 556, 567  
 Biegedehnung beim Bruch 156, 567  
 Biegedehnung bei Biegefestigkeit 156  
 Biegefestigkeit 155, 157, 568, 604, 654  
 Biegekriechmodul-Kurven 191  
 Biegemodul 151, 155, 567, 582, 604, 609  
 Biegemoment 148, 175, 567, 584, 603  
 Biegeschwingung 103, 175, 501  
 Biegeschwingversuch 103, 105, 173, 249  
 Biegespannung beim Bruch 156, 567, 603  
 Biegespannungs-Randfaserdehnungs-Diagramm 155, 191  
 Biegesteifigkeit 149, 165, 569  
 Biegestreifenverfahren 417, 421  
 Biegeversuch 147, 153, 539, 567  
 Biegewechselbeanspruchung 173  
 Bindenahtqualität 335, 498, 537, 637  
*Bingham*-Körper 49  
 Bitumen 315  
 Blunting Line 260  
 BMI/CF-Verbund 595  
 Boeing Druck-Prüfmethode 7, 564  
 Boeing Open-Hole Compression Prüfung 589  
*Boltzmann*'sche Konstante 86, 379, 454  
*Boltzmann*'sches Superpositionsprinzip 91  
 Brandparameter 612, 630  
 Brandprüfung 609, 614, 625, 633  
 Brandrisiko 615, 624  
 Brandstellen 637  
 Brandverhalten 609, 629  
 Brechung 324, 330  
 Brechungsgesetz von *Snellius* 325, 331  
 Brechungsindex 324, 363, 463, 467, 473, 480  
 Brechungswinkel 324  
 Brechzahl 324, 329, 346  
 Bremsstrahlung 463  
 Brennbarkeitsprüfung 614, 616  
 Brooming 563  
 Bruch 131, 250, 297, 562, 580, 657  
 Bruchdehnung 23, 129, 146, 560, 685  
 Bruchflächenuntersuchung 254, 257  
 Bruchkriterium 253  
 Bruchmechanische Kennwerte  
 – Faserverbundwerkstoffe 587  
 – Kunststoffe 285  
 – TPU/ABS-Blends 288  
 Bruchmechanische Konzepte 250, 552  
 Bruchmechanische Werkstoffprüfung 248, 423, 522, 539, 579  
 Bruchmoden 250, 580  
 Bruchschwingspielzahl 173  
 Bruchsicherheit 253, 298, 587  
 Bruchspannung 112, 126, 416, 427  
 Bruchvorgang 254, 258, 265, 268, 414  
 Bruchzähigkeit 251  
 – dynamisch 266  
 – statisch 251, 253  
 Bruchzähigkeit (Härte) 691  
 Bruchzeit 269, 416, 423, 427, 432, 446, 450  
 Brückenmessung 368  
 Buckling 563  
 Burst 517
- C**
- CAMPUS-Datenbank 15, 18, 164  
*Carreau*-Modell 49, 77  
 C-Bild-Technik 490, 594  
 Celanese-Prüfmethode 565  
 Cellulose-Acetobutyrat 393  
 Cellulose-Triacetat 393  
 C-Faser 554, 588, 594, 638  
 CFK 176, 558, 563  
 CFK-Laminat 468, 479, 486, 496, 508, 512, 517, 581  
*Charpy*-Anordnung 159  
*Charpy*-Kerbschlagzähigkeit 161, 163  
*Charpy*-Schlagzähigkeit 161, 164  
 Chemisch aktives Medium 414  
 Chemische Beständigkeit 414  
 closed-loop-Systeme 70, 135  
*Cole/Cole*-Funktion 377  
*Cole/Davidson*-Funktion 377  
 Compliance (Nachgiebigkeit) 84, 90, 98, 100, 118 f., 135, 582, 586  
 Compression-After-Impact-Test 548, 593  
 Compton-Rückstreuung 466  
 Cone-Kalorimeter 618, 625, 629, 633  
 Constraint-Faktor 257  
*Corten* 271  
*Couette*-Messsysteme 54, 59  
 Crazebildung 113, 449  
 Crazelänge 448  
 Craze-Mechanismus 146  
 Crazes 96, 146, 247, 417, 429, 438, 449, 541  
 Crazestruktur 447f.  
 Crazewachstum 449  
 Crazewachstumsgeschwindigkeit 449  
 CTOD-Konzept 254, 696  
 CT-Prüfkörper 252, 424, 532, 688, 693  
 Curie-Punkt 314
- D**
- Dampfdruck 440  
 Dämpfung 462, 489, 512  
 Dämpfungsverhalten 100  
 Dauerfestigkeit 173, 178  
 Dauergebrauchstemperatur 607, 641, 658  
 Dauerschwingversuch 171  
*Debye*-Funktion 376, 484  
 Deckvermögen 323, 339, 348

- Deckvermögenswert 348  
 Defektdichte 132  
 Defektorrtung (Fehlerortung) 489, 521  
 Defektoskopie 530  
 Defektselektive Abbildung 508  
 Deformation (energie-, entropplastisch, viskos) 82, 84  
 Deformationsarbeit 208, 532  
 Deformationsfeld 132, 151, 478, 541  
 Deformationsgebiet 255  
 Deformationsgeschwindigkeit 50, 73, 87, 125  
 Deformationsmechanismus 95, 135, 146  
 Deformationsmodell 284  
 Deformationspolarisation 360  
 Deformationsprozess 87, 95, 117, 531, 534, 539  
 Deformationsverhalten 85, 95, 111, 114, 116, 124, 126,  
 129, 132, 146, 151, 208, 212, 535, 541  
 Deformationszone 140, 553  
 Deformationszustand 82, 85, 541  
 Degradationsverhalten 318, 661  
 Dehngeschwindigkeit 50, 72, 74  
 – nominelle 120  
 – wahre 134  
 Dehnmessstreifen 266, 557, 563, 567, 571, 594  
 Dehnmessstreifenrosette 573  
 Dehnrate 120, 134, 136  
 Dehnrheometer 53, 71  
 Dehnung 82, 86, 89, 95, 119  
 Dehnung bei Streckspannung 127  
 Dehnungsgeregelter Zugversuch 120, 131, 136, 171  
 Dehnungsnachweis 298  
 Dehnungs-Zeit-Diagramme 113, 535  
 Dehnviskosität 50, 72  
 Delamination 151, 170, 311, 480, 509, 517, 548, 575,  
 582, 584, 592  
 Delaminationslänge 582, 584  
 DENT-Prüfkörper 294  
 Depolymerisation 316, 413, 611  
 Desorption 314  
*Deybe*-Funktion 307, 376, 484  
 Dichroismus 346  
 Dichte 307, 421, 464, 636  
 Dichtemessung 36, 125  
 Dielektrikum 360  
 Dielektrische Eigenschaften 357, 372  
 Dielektrische Messtechnik 383  
 Dielektrische Permittivität 358, 374  
 Dielektrischer Verlustfaktor 359, 362, 374, 521  
 Dielektrische Spektroskopie 372, 484, 520  
 Dielektrische Suszeptibilität 361  
 Dielektrische Verlustwinkel 484  
 Dielektrische Verlustzahl 359  
 Dielektrizitätszahl 359  
 Dielektrometrie 639  
 Differential Scanning Calorimetry 36, 306  
 Diffusionsgeschwindigkeit 431, 446, 615  
 Diffusionsgleichgewicht 426  
 Diffusionskonstante 37  
 Diffusionsprozesse 448, 450  
 Digitale Bildverarbeitung 686  
 Digitale Grauwertanalyse 696  
 Dilatationsanteil 82  
 Dimensionierung 115, 181, 297, 426, 529, 680  
 Dipolmoment 378  
 Dispersion 323, 325, 329  
 Distributed circuit-Methode 383  
 Doppelbrechung 36, 209, 329, 331, 334, 336, 343  
 Dow-Säbel-Test 417  
 Dreipunktbiegeversuch 150, 567, 582  
 Druckbeanspruchung 139, 175, 556, 563, 589  
 Druckfestigkeit 144, 146, 563, 566, 594, 657  
 Druckfließspannung 143, 212  
 Druckfluss-Widerstands-Kurven 667  
 Druckkriechkurve 192  
 Druckschwellbereich 172  
 Druckspannung 140, 144, 212, 323, 564, 569, 691  
 Druckspannungs-Stauchungs-Kurven 144, 192, 213,  
 564  
 Druck-Vakuumtest 651  
 Druckversuch 139, 146, 563, 594  
 Druckwechselbeanspruchung 181  
 D-Scan-Technik 490, 497  
*Dugdale*'sches Rissmodell 254  
 Dunkelfeldbeleuchtung 346, 351, 470  
 Durchbiegungs-Zeit-Diagramm 540  
 Durchgangswiderstand 359, 364  
 Durchschlagfestigkeit 359, 393, 395  
 Durchschlagspannung 359  
 Durchsichtigkeit 323, 348  
 Durchstoßversuch 167, 663  
 Durchstrahlungsprüfung 464  
 Durchzugversuch 667  
 Dynamische Differenz Kalorimetrie 108, 306  
 Dynamische Differenz-Thermoanalyse 306, 312  
 Dynamische-Mechanische Thermische Analyse 307  
 Dynamischer Wärmetransport 509  
 Dynamische Viskosität 63  
 Dynamisch-Mechanische Analyse 98, 609  
*Dynstat*-Anordnung 160
- E**
- ebener Dehnungszustand 253, 451, 538  
 ebener Spannungszustand 119, 253, 451, 538, 549  
 Edge-Delamination Test 548, 588  
 Eichen 10  
 Eigenfrequenz 101, 462, 498, 501, 519  
 Eigenspannung 21, 32, 36, 114, 128, 158, 195, 203, 321,  
 470, 555, 637, 640, 679  
 Eigenspannungszustand 127, 153, 415, 470  
 Eindringarbeit, elastischer und plastischer Anteil 208  
 Eindringhärte 206, 210, 212  
 Eindringkörper 194, 197, 201, 206

- Eindringkörper nach Knoop 197  
 Eindringmodul 208, 210  
 Eindringtiefe 6, 195, 200, 203, 206, 602, 690  
 Einfache Rissöffnung 579  
 Einfeldträgerversuch 652  
 Einprobenmesstechnik 539, 541  
 Einsatztemperatur 216, 292, 606  
 Einschnürbereich 131  
 Einschnürdehnung 131  
 Einstufenschwingversuch 173  
 Elastischer Eindringmodul 208  
 Elastisches Verhalten 83, 306, 670  
 Elastische Verformung 112, 646  
 Elastische Wellen 307, 311, 488, 498, 502, 515  
 Elastizitätsmodul 23, 84, 96, 114, 547  
 – Biegeversuch 151, 155, 609  
 – Druckversuch 142  
 – dynamisch 609  
 – statisch 114, 129, 562  
 – Zugversuch 115, 123, 130, 560  
 Elastomere Werkstoffe 125, 541  
 Elektrische Durchschlagfestigkeit 359, 393, 395  
 Elektrische Feldstärke 360, 391, 481  
 Elektrische Festigkeit 359, 392  
 Elektrische Leitfähigkeit 359, 363, 394, 485, 512  
 Elektrischer Durchschlag 394  
 Elektrischer Widerstand 363  
 Elektrodenanordnung 367, 395  
 Elektrodenpolarisation 360, 372  
 Elektromagnetische Welle 463, 511  
 Elektronische Speckle-Pattern-Interferometrie 474  
 Elektro-Servohydraulische Prüftechnik 175  
 Elektrostatische Aufladung 359, 370, 390  
 Emissionskoeffizient 480, 513  
 Emissionsprüfung 648  
 Emissivität 532  
 E-Modul (Härte) 208, 690  
 Endaufladung 359, 391  
 Energiebilanz 269  
 Energiedissipative Schädigungsmechanismen 532  
 Energieelastizität 83, 85  
 Energiefreisetzungsrate 258, 284, 553, 579, 581, 584, 588, 591  
 Energie-Zeit-Diagramm (Durchstoßversuch) 169  
 Entflammbarkeit 614  
 Enthalpieänderung 313, 624  
 Entropieelastische Dehnung 26  
 Entropieelastizität 83, 86, 107  
 Entzündbarkeit 614, 616 f., 619  
 Entzündung 391, 397, 610, 613, 617, 622, 631  
 Entzündungstemperatur 610, 613, 621  
 Entzündungszeit 625  
 EP/CF-Faserverbundwerkstoffe 587, 595  
 E/P-Copolymere 212, 285  
 EPDM-Kautschuk 318  
 EP/GF-Faserverbundwerkstoffe 572, 588  
 EP/GF-Verbundwerkstoffe 347, 632  
 Epoxidharz 130, 147, 332, 346, 365, 381, 487, 499, 512, 552, 608, 632, 685  
 Epoxidharz/Hanflaminat 632  
 E/P-SiO<sub>2</sub>-Verbund 687  
 Erichsen-Prüfstab 201  
 Ermüdung 171  
 Ermüdungsbruch 646  
 Ersatzträgerversuch 652  
 Erzeugnisprüfung 638  
 Erzwungene Schwingung 99, 103  
 Euler'sche Stabilität 141  
 Extinktionskoeffizient 633  
 Extrusimeter 70  
 Eyring-Gleichung 87, 95
- F**
- Fade-Ometer 355  
 Fallbolzenversuch 159, 167, 170, 592  
 Falltest 647  
 Fallwerk 167, 277  
 Faraday-Effekt 330  
 Farbänderung 350, 356  
 Farbe 344, 636  
 Farberkennung 348  
 Farbmessung 344  
 Farbtafel 345  
 Farbunterschiede 344, 356, 637  
 Faser-Matrix-Grenzfläche 284, 468, 487, 531, 553, 593  
 Faser-Matrix-Haftung 286, 536, 547, 561  
 Faserorientierung 216, 323, 346, 468, 491, 504, 560, 593  
 Faser pull out 283, 285  
 Faserverbundwerkstoffe 147, 180, 487, 547, 553, 571, 587  
 Faserverstärkte Kunststoffe 282, 493  
 Faservolumengehalt 282, 480, 558  
 FEM-Netzwerk 273, 298  
 Fertigteile 606, 635 f.  
 Fertigteilegestaltung 635  
 Fertigungskontrolle 636  
 Festigkeitsnachweis 298  
 Festigkeitsprüfung 635, 657  
 Feuchteaufnahme 38, 557  
 Feuchtigkeit 317, 367, 391, 413, 551  
 Feuerbeständigkeit 626  
 Fibre Bridging-Effekt 554  
 Fibrillen 96, 337, 429, 448, 541  
 Finite-Elemente-Methode 249, 272, 298, 550, 679, 699  
 Flächenanalyse 559  
 Flächenpolarisator 332  
 Flächenträgheitsmoment 141, 150  
 Flachprüfkörper 116, 174  
 Flammenausbreitung 611, 614, 621, 623, 631

Flammenausbreitungsprüfung 619  
 Flammenionisations-Detektor 649  
 Flammfestigkeit 633  
 Flammenschutz 612f., 676  
 Flash over 610  
 Fließbruchmechanik 248, 260, 299  
 Fließfähigkeit 47, 607  
 Fließgeschwindigkeit 61, 446, 520  
 Fließkurve 48, 66  
 Fließspannung 95, 144, 213, 288, 449  
 Fließstauchung 145, 151  
 Fließverhalten 46, 49, 52, 61  
 Fließzone 125, 643  
 Folienanisotropie 336  
 Formabweichungen 637  
 Formbeständigkeit 601, 604, 668  
 Formmasse 17, 29, 43, 120, 634, 638, 672  
 Formmasseeigenschaften 19, 114, 120, 635  
 Formmasseprüfung 19  
 Formpressen 21, 25, 29  
 Formstoff 17, 45, 147, 188, 368, 636  
 Formteilanisotropie 333  
 Formteile 17, 25, 35, 182, 249, 323, 356, 395, 634, 637, 649  
 Fotometer 636  
 Fourier-Korrelationsanalyse 386, 511  
 Fourier-Transformation 477, 498, 505, 517  
 Fourier-Transformations-Spektroskopie 352  
 Freie gedämpfte Schwingung 101  
 Freies Volumen 51  
 Fremdentzündungstemperatur 613  
 Frequenz 98, 108, 363, 373, 385, 389, 462, 480, 484, 486, 489, 498, 501, 507, 516, 518, 543, 646  
 Frequenzbereich 383, 390, 506  
 Frequenzganganalysator 387  
 Frequenzganganalyse 268, 385, 484, 499  
 Frequenzspektrum 499f., 511  
 Füllfaktor 44  
 Füllstoffe 161, 225, 278, 306, 322, 612  
 Füllstoffgehalt 226, 606  
 Funktionsfähigkeit 219, 634, 640, 679, 682  
 Funktionsprüfung 368, 635f.

## G

Gangunterschied 331, 334, 343  
 Gaschromatografie 639  
 Gebrauchsfähigkeit 643  
 Gebrauchsprüfung 636  
 Gebrauchstauglichkeit 634, 636, 640  
 Gebrauchstemperatur 432, 606, 658  
 Geometriefunktion 251, 277  
 Geometriekriterien
 

- CTOD 257
- J-Integral 259
- LEBM 254, 681, 697

Geometrieunabhängigkeit 259, 274, 289, 298  
 Gesamttransmission 350  
 Geschwindigkeits-Temperatur-Verschiebungs-Konzept 298  
 Gestaltsänderung 606, 636  
 Gewaltbruch 646  
 GFK-Formteil 483  
 GFK-Laminat 493, 495, 581  
 GFK-Rohr 641  
 Gießen von Prüfkörpern 29  
 Glanz 323, 340, 344, 355  
 Glanzhöhe 342  
 Glanzmessung 342  
 Glanzunterschiede 637  
 Glasfasergehalt 283f., 286, 484, 503, 537, 605  
 Glastemperatur 27, 52, 86, 96, 108, 289, 292, 314, 380, 429, 443  
 Glasübergang 93, 107, 307, 313f., 380, 444, 601, 609  
 Glaszustand 95, 106, 108, 115, 373  
 Gleichmaßdehnung 134  
 Gleitprozess 96, 283, 429, 431  
 Glührückstand 636  
 Goniophotometer 342  
 Grauwertkorrelationsanalyse 686, 692, 696  
 Grenzaufladung 359, 391  
 Grenzflächenspannung 440, 444  
 Grenztemperatur 29, 176, 282, 640  
 Grunddispersion 329

## H

Haarrisse 637  
 Haftvermittler 18, 285, 372, 536  
*Hagen-Poiseuille*'sches Gesetz 62  
 Halbleiterdehnmessstreifen 262, 266, 276  
 Harnstoffharz 130, 147, 158, 164, 365  
 Härte 193  
 Härtebereich (Mikro, Makro, Nano) 204  
 Härtemessverfahren nach *Vickers* 195, 211, 691  
 Härteprüfung nach *Shore* 200  
 Harzinjektionsverfahren 555  
 Hauptrelaxationsprozess 107, 320, 380  
 Hauptsatz nach *St. Venant* 551  
 Hauptvalenzbindung 126, 305  
*Havriiak/Negami*-Modellfunktion 377  
 Heat Distorsion Temperature 602, 604, 608  
 Heat Release Rate 617, 626, 631  
 Heizrate 315, 321, 602  
 Hellfeldbeleuchtung 347  
 Helligkeit 341, 349  
*Hencky*-Dehnung 50, 82  
 Herstellung von Prüfkörpern 20
 

- Duroplaste 29
- Elastomere 30
- Thermoplaste 22

*Hertz*'sche Pressung 118

Heterogenität 132, 280, 335, 415, 535, 561  
 Hochdruckkapillarrheometer 60, 64, 66, 69  
 Höhenlinien 473, 475, 477  
 Holografie 474  
 Hooke'sche Gesetz 28, 84, 123, 151, 487  
 Hopkinson-Bar-Apparatur 592  
 Hybride Methoden der Kunststoffdiagnostik 131, 529, 531, 607

## I

Identifizierung von Kunststoffen 314, 351  
 IITRI-Methode 565  
 Immersionsmethode 326  
 Impactschäden 469, 489, 500, 508, 514, 593  
 Impedanz 268, 384, 388, 487, 512  
 Impedanzanalyse 385, 388, 499  
 Impedanzmessbrücke 388  
 Implantatprüfung 660  
 Indirekte Formgebung 23, 32, 121  
 Induktive Dehnungsaufnehmer 557  
 Infrarotkamera 509, 532  
 Infrarotspektroskopie 351  
 Innere Remission 340  
 In-plane Schubspannungszustand 574, 592  
 In-situ-Atomkraftmikroskopie 694, 696  
 In-situ-Belastungsmodul 695  
 In-situ Deformationsmessungen im AFM 694  
 In-situ Messverfahren 530  
 In-situ-R-Kurven 540  
 instabile Rissausbreitung 213, 248, 252, 255, 267, 296  
 Instrumentierte Härteprüfung 203  
 Instrumentierter Durchstoßversuch 169  
 instrumentierter Fallversuch 276  
 instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch 266  
 instrumentierter Kerbschlagzugversuch 293  
 instrumentiertes Fallwerk 276  
 Intensitätsschwächung 464  
 Interfacefestigkeit 662, 664  
 Interferenz 323, 333, 343, 370, 473  
 Interferenzmikroskopie 343  
 Interferometrie 475  
 Interferometrische Verfahren 474, 501  
 Interlaminare Bruchzähigkeit 552  
 Interlaminare Rissausbreitung 579  
 Interlaminare Risszähigkeit 579, 581  
 Interlaminare Scherfestigkeit 570  
 IR-Spektren 352  
 IR-Strahler 629  
 Isochromaten 332, 335  
 Isoklinen 332  
 Isolationswiderstand 359, 368, 385  
 Isolationswiderstandsmessung 368  
 Izod-Anordnung 159, 163

## J

J-Integral 259  
 J-Integral-Konzept 258  
 $J_R$ -Kurve 260  
 $J_{TJ}$ -Konzept 261  
 Justieren 10  
 J-Werte 258, 264, 271, 294  
 - dynamisch 275, 277, 296  
 - statisch 263, 274, 542  
 J- $\Delta$ -Kurve 261

## K

Kalibrieren 10, 538  
 Kapillarrheometer 53, 60, 68, 71, 74  
 Kegel-Platte-Rheometer 54, 56, 74  
 Kennwertermittlung 5, 147, 266, 396, 423, 548, 683, 692  
 Kerbaufweitung 255, 262, 530  
 Kerbempfindlichkeit 162  
 Kerbradius 162f., 251, 576  
 Kerbschlagbiegeversuch 159, 163, 266, 281, 542  
 Kerbschlagzähigkeit 161, 163, 281, 287, 297  
 Kerbschlagzugversuch 165, 293  
 Kerbschlagzugzähigkeit 166  
 Kerbspitze 256, 423, 429  
 Kern-Schale-Struktur 35, 290  
 Kirchhoff'sche Plattenhypothese 551  
 Kirkwood/Fröhlich-Korrelationsfaktor 379  
 Klappenauslenkungstest 667  
 Kleberakustik 499  
 Klebverbindung 520, 580, 586  
 Kleinbereichsfließen 254, 283  
 Kleinwinkellichtstreuung 349  
 Klimabeständigkeit 355, 647  
 Klima-Schwingungs-Innendruck-Test 648  
 Knoop-Härte 36, 196  
 Koaxiales Reflektometer 390  
 Koaxiales Zylinderrheometer 54, 59  
 Kohäsionsenergiedichte 440  
 Kohlebogenlampen 355  
 Kohlefaserverstärkte Kunststoffe 176, 558  
 Kohlenstofffaser 220, 485, 495, 551, 555  
 Kohlrausch/Williams/Watts-Funktion 378  
 Komplexe Dielektrizitätszahl 359, 484  
 Komplexe Permittivität 359  
 Komplexer Schermodul 99  
 Komplexe spezifische Leitfähigkeit 362  
 Kompressionsmodul 85  
 Konditionierung 37, 372  
 Konstante Spannungsmethode 369  
 Konstante Strommethode 369  
 Korrespondenzprinzip 93  
 Korrosion 218, 411, 413, 461  
 Kraft-Durchbiegungs-Diagramme 265, 269, 413, 670, 688

Kraft-Eindringtiefe-Kurve  
 – Beispiele 209  
 – Nanohärte 691  
 – schematisch 205  
 Kraft geregelter Zugversuch 131  
 Kraft-Kerbaufweitung 262  
 Kraft-Kraftangriffspunktverschiebungs-Kurven 258,  
 262, 688  
 Kraft-Weg-Diagramm (Durchstoßversuch) 169  
 Kraft-Weg-Diagramm (Kriechversuch) 655  
 Kraft-Zeit-Diagramm 268, 276, 294, 540  
 Kratzfestigkeit 343  
 Kreisfrequenz 74, 98, 361, 386, 388, 462  
 Kriechfaktor 654  
 Kriechgeschwindigkeit 186  
 Kriechkurven 182, 184, 187, 191  
 Kriechmodul 185  
 Kriechmodul-Kurven  
 – Biegung 191  
 – Druck 192  
 – Zug 185, 187, 190  
 Kriechstromfestigkeit 359, 397, 399  
 Kriechverhalten 182, 186, 190, 192, 196, 205, 655  
 Kriechversuch 98, 183, 186, 188, 192, 652, 654  
 Kriechweg 397f.  
 Kriechwegbildung 359, 398  
 Kristallinität 231, 306, 420, 430  
 Kristallinitätsgrad 36, 110, 116, 216, 306, 350, 434  
 Kristallitschmelzbereich 601  
 Kritische Dehnung 417, 442, 444, 533  
 kritische Rissöffnung 255  
 – dynamisch 275  
 – statisch 275  
 Kugeldruckhärte 198, 202  
 Kugeleindrückverfahren 419  
 Kunststoffbauteile 115, 117, 171, 182, 214, 249, 529, 634,  
 640, 646, 651, 662  
 Kunststofffertigteile 636  
 Kunststoffmantelrohre 635, 651, 655  
 Kunststoff-Metall-V Verbundrohr 641  
 Kunststoffrohrprüfung 641, 643  
 Kunststoffverarbeitung 3, 44  
 Kurzbiegeversuch 570  
 kurzfaserverstärkte Kunststoffe 283, 285, 574  
 Kurzkettenverzweigung 430, 434  
 Kurzzeitprüfung 396, 642, 654  
 K-Wert 63, 295, 309

## L

Labormessextruder 71  
 Lageabweichungen 637  
 Lambwellen 494, 496, 503  
 Lamellen 210, 436  
 Lamellendicke 110, 210  
 Lamellendickenverteilung 210

Laminatherstellung 555  
 Laminattheorie 550  
 Landes 264, 271  
 Längsscherung 579  
 Längsspannung 573  
 Langzeitfestigkeit 643  
 Langzeitverhalten, statisch 182f.  
 Laser-Doppelscanner 262  
 Lasererzeugter Ultraschall 497  
 Laserextensometrie 131, 137, 530, 534, 684  
 Laser-Flash-Methode 310  
 Laserholografie 36  
 Laser-Interferometrie 132, 693  
 Laser-Multiscanner 537, 539  
 Laser-Scanning-Mikroskopie 471, 692  
 Laser-Speckle-Interferometrie 684  
 Laserstrahl 262, 470, 474, 507, 514, 535, 538  
 Lasertechnik 354  
 Laservibrometer 502, 506, 508  
 Last-Verformungs-Diagramm (Push-out-Test) 663  
 Lastwechsel 655  
 Laufzeit 463, 498, 515  
 Lebensdauer 113, 179, 182, 521, 607, 634, 644, 646,  
 660  
 LEBM 248, 250, 254, 257, 263, 274, 276, 283, 295,  
 552, 697  
 Leistungsdichte 497  
 Leistungskompensationsprinzip 312  
 Lichtbogenfestigkeit 359, 397, 399  
 Lichtgeschwindigkeit 470  
 Lichtmikroskopie 36, 346, 350, 539  
 Lichtschwächung 627, 631, 633f.  
 Lichtstreuungseffekte 350, 354  
 Ligament 254  
 Linearanalyse 559  
 Linear-elastische Bruchmechanik 250, 552, 682, 697  
 Linear-elastische Verformung 112, 131, 182  
 Linear-viskoelastische Verformung 88, 112, 131  
 Liquid-Crystal-Polymer (LCP) 484  
 Lochbildung 541  
 Lockin-Thermographie 513, 515, 517, 520  
 Logarithmisches Dekrement 102, 105  
 Lokale Deformation 132, 534, 538  
 Longitudinalwellen 105, 487  
 Lösbarkeit 627  
 Löslichkeitsparameter 440, 443, 450, 452  
 Luftfeuchtigkeit 37f., 98, 222, 317, 356, 370, 392, 415  
 Luftultraschall 503  
 Lumped circuit-Methode 383

## M

Maleinsäureanhydrid 167  
 Martens-Härte 203  
 Maßabweichungen 182, 636f.  
 Masseabnahme 624, 629, 631

Massebestimmung 638  
 Massenverlustkalorimetrie 624  
 Masseverlust 317, 617, 629, 633  
 Maßprüfung 635  
 Masterkurve 93, 109  
 Materialprüfmaschine 201, 204, 423, 471  
*Maxwell*-Modell 89  
*Maxwell*'sche Gleichungen 360  
*Maxwell/Wagner/Sillars*-Polarisation 360, 372  
 Mechanische Bearbeitung 33  
 Mechanischer Klirrfaktor 505  
 Mechanischer Verlustwinkel 520, 608 f.  
 Mechanische Spektroskopie 96, 307  
 Mechanische Vibrometrie 498  
 Mechanodiektrometrie 530  
 Medienkammer 39, 423  
 Melaminharz 130, 147, 365, 605  
 Memory-Effekt 26  
*Merkle* 264, 271  
 Merkmalsebene 520  
 Messbrücke 385, 484, 499  
 Metallklingenkerb 162, 263, 265, 293  
 MFR-Wert 68, 421, 434  
*Micro-Moiré*-Verfahren 684  
 Mikrobiegebalkenprüfung 682, 698  
 Mikrohärte 199, 205, 211  
 Mikroinhomogenität 577  
 Mikroprüfkörper 683  
 Mikroprüftechnik 679 f., 698  
 Mikrorisse 311, 435, 469, 496, 680, 682  
 Mikroschädigungen 130, 132, 529, 533  
 Mikrostruktur 6, 216, 255, 576, 587, 638, 680  
 Mikrowellenanalyse 36, 480, 486, 492  
 Mikrowellenanisotropie 482  
 Mikrowellenrasterbildverfahren 483  
 Mikrozugprüfung 682 f., 698  
 Miniaturbauteile 204, 690  
 Miniaturisierte CT-Prüfkörper 687, 689  
 Miniaturisierte Prüfkörper 679, 685, 688  
 Mittelspannung 171, 173  
 Mixed-Mode Beanspruchung 579, 586  
 Mode II-Bruchzähigkeit 554  
*Moiré*-Effekt 473, 475  
*Moiré*-Streifen 473  
*Moiré*-Verfahren 684, 693  
 Molekülkettenbeweglichkeit 431, 452, 601  
 Molekülkettenentschlaufung 431, 450, 452 f.  
 Molekülorientierung 436, 606  
 Molmasse 50, 63, 86, 109, 420, 425, 430, 432, 446, 454, 612  
 Molmassenverteilung 432, 446  
 Morphologie 34, 36, 116, 159, 195, 204, 216, 249, 278, 292  
 Morphologieparameter 534, 587  
 MVR-Wert 69

## N

Nachchloriertes PVC 641, 644  
 Nachgiebigkeit 84, 90, 98, 100, 118, 135, 582, 586  
 Nachgiebigkeitstensor 84  
 Nachkristallisation 117, 321  
 Nachschwindung 637  
 Nano-Eindringprüfung 682, 690  
 Nanomechanik 522, 690  
 Nebenrelaxationsprozess 107, 379  
 Nebenvalenzbindung 305  
 Netzmittel 421, 431, 435, 454  
 Neuronale Netze 229  
*Newton*'sche Fluide 47, 50, 58, 61, 64  
*Newton*'sche Gleichung 47  
*Newton*'sches Verhalten 47, 87  
 Nichtlineares Werkstoffverhalten 264, 502  
 Nichtlineare Vibrometrie 506  
 Nichtlineare Viskoelastizität 94, 113, 132  
 Nicht-*Newton*'sche Fluide 47, 59, 61  
*Nicol*'sches Prisma 331  
 Niederdruckkapillarrheometer 60, 63  
 Normalisierung 37, 39  
 Normalspannung 56, 79, 101, 118, 139, 151, 550, 572  
 Normalspannungsbruch 253  
 Normalspannungsdifferenz 57, 74  
 Normalspannungskoeffizient 67  
 Norm-Biegespannung 155, 157  
 Normfarbwerte 345, 348  
 Normierte Scherfestigkeit 664  
 Normierte Wärmefreisetzungsrate 631  
 Normklima 37

## O

Oberflächendeformation 477  
 Oberflächenermüdung 218  
 Oberflächenladungsdichte 391  
 Oberflächenreflexion 341  
 Oberflächenspannung 441  
 Oberflächentemperatur 174, 509, 511, 513  
 Oberflächentopografie 222, 224, 472  
 Oberflächenwiderstand 359, 363, 366, 368, 392  
 Oberschwingung 505, 507  
 Oberspannung 172  
 Off-Axis Zugversuch 571  
*Ohm*'scher Widerstand 369, 383  
*Ohm*'sches Gesetz 361, 363, 369  
 Online-Qualitätsüberwachung 4, 336, 521  
 Online-Rheometer 70  
 Open Hole Compression Test 548, 589  
 Optische Aktivität 330  
 Optische Eigenschaften 323, 339, 350  
 Optische Extensometer 557  
 Optisches Ausdehnungsmessgerät 320

Orangenschaleneffekt 637  
 Ordnungszahl 104, 464, 466  
 Orientierung 18, 23, 25, 28, 34, 36, 96, 110, 114, 116,  
 125, 127, 132, 138, 153, 159, 195, 197, 204, 321, 333,  
 346, 436, 438, 468, 481, 492, 496, 535, 555  
 Orientierungspolarisation 360  
 Osmotischer Druck 440  
 Out-of-plane Schlagversuche 592  
 Oxidative Induktionszeit 316  
 Oxidativer Abbau 611

## P

PA/CF-Verbund 130, 366  
 PA/GF-Verbund 23, 130, 147, 164, 176, 180, 201, 285,  
 366, 533, 537, 608  
*Paris* 264, 271  
 PB-1/GF-Verbund 164, 285  
 PBT/GF-Verbund 158, 285, 498, 605  
 PC/GF-Verbund 491, 503  
 PE/BW-Verbund 279  
 PEEK 130, 604, 664  
 PEEK/CF-Verbund 227, 588  
 PEEK/GF-Verbund 227  
 PEEK/PTFE-Verbund 226  
 Peel-Kraft 591  
 PE-HD/Kreide-Verbund 281  
 PE-HD/NBR-Blend 167  
 PE/HP-Verbund 279  
 Peltier-Elemente 514, 532  
 Pendelhammargeschwindigkeit 267  
 Pendelschlagwerk 159, 160, 165, 266, 293  
 PE/PP-Blends 287  
 Periode der Trägheitsschwingung 268  
 Permeation 648  
 Permeationsprüfung 648, 650  
 Permittivität 359, 374, 391  
 Peroxidradikalbildung 610  
 PE-RT 645  
 PE/SiO<sub>2</sub>-Verbund 279  
 PET/GF-Verbund 158, 605  
 PE-UHMW 351, 604, 660  
 PE-X 170, 641, 644  
 Pharyngo-tracheale Stimmprothesen 665  
 Phasengeschwindigkeit 462, 495  
 Phasenverschiebung 99, 171, 361, 505, 511, 513  
 Phenolharz 130, 147, 158, 365, 605  
 Phenol (Verträglichkeitsvermittler) 167  
 Photometerstrom 342  
 Piezoelektrischer Sensor 202, 488, 505  
 Plastic-Hinge-Modell 256, 275  
 Plastische Härte 206  
 Plastische Verformung 95, 112, 148, 199, 247  
 Plastische Zone 255, 263, 265, 283, 289, 553  
 Plate-Twist Schubversuch 576, 588  
 Platte-Platte-Rheometer 54, 57, 74

PMMA 130, 144, 146, 155, 158, 164, 200, 332, 366, 374,  
 378, 424, 440, 496, 512, 604, 660  
 PMMA-Superlayer 691  
 Poisson'sche Querkontraktionszahl 84, 124, 202, 208  
 Polarimeter 332  
 Polarisation 330, 337, 361  
 Polarisationsmikroskopie 36, 335  
 Polyamid 130, 136, 158, 164, 200, 230, 278, 285, 365,  
 374, 532, 537, 604  
 Polybutadien 110, 440, 641, 644  
 Polybutylenterephthalat 130, 158, 604  
 Polycarbonat 130, 158, 164, 200, 365, 393, 399, 438,  
 443, 449, 505, 604  
 Polyester 393 f., 538  
 Polyetheretherketon 130, 227, 604, 664  
 Polyethylen  
 - hohe Dichte 67, 115, 130, 158, 164, 190, 200, 224,  
 280, 285, 366, 374, 393, 399, 420, 425, 431, 453,  
 604, 641, 643  
 - linear, niedrige Dichte 67, 73, 115, 130, 158, 164,  
 200, 353, 354, 399, 604  
 Polyethylenaphthalat 227, 374  
 Polyethylenterephthalat 2, 130, 164, 336, 381, 413,  
 440, 604  
 Polyimid 399  
 Polymerdispersion 43  
 Polymethylmethacrylat 67, 147, 158, 164, 200, 332,  
 366, 496, 604, 660  
 Polyoxymethylen 130, 158, 164, 200, 314, 317, 353, 604  
 Polyphenylenoxid 440, 443  
 Polyphenylsulfid 225, 322  
 Polypropylen 28, 67, 130, 158, 164, 188, 200, 208, 253,  
 271, 337, 343, 366, 393, 399, 404, 447, 452, 471, 504,  
 604, 641  
 Polystyrol 25, 67, 115, 130, 158, 164, 200, 334, 365,  
 422, 428, 435, 442, 447, 451, 495, 604, 689  
 Polysulfon 443  
 Polytetrafluorethylen 147, 164, 192, 226, 512, 567, 660  
 Polyurethan 130, 147, 158, 604, 668  
 Polyvinylbutyrat 108 f.  
 Polyvinylchlorid  
 - weichmacherfrei 130, 158, 164, 191, 200, 366, 374,  
 399, 440, 447, 508, 510, 604, 641, 644, 660  
 - weichmacherhaltig 130, 158, 164, 295, 366, 604  
 Potenzgesetz nach *Ostwald-de Waele* 48, 58  
 PP-Copolymer/GF-Verbund 543  
 PP/EPR Blends 265  
 PP/EPR-Copolymer 343  
 PP/EPR/PE-Copolymere 289  
 PP/GF-Verbund 130, 147, 201, 286, 491, 495, 503, 606  
 PP/Kreide-Verbund 130, 164, 279, 687  
 PPS/GF-Verbund 322  
 PP/Talkum-Verbund 130, 164, 343, 605 f.  
 Prepreg 484, 496, 555, 593  
 Pressen von Formmassen 29  
 Prinzip von *Huygens* 324

Produkthaftung 10, 520  
 Prothesendurchzugtest 668  
 Prüfklima 37  
 Prüfkörperanordnung 165, 266, 276, 309, 614, 620  
 Prüfkörperdicke 38, 138, 253, 259, 274, 336, 353, 364, 428, 450, 568, 689  
 Prüfkörperformen für FVK  
 – 4ENF-Prüfkörper 584  
 – CLS-Prüfkörper 586  
 – DCB-Prüfkörper 580  
 – EDT-Prüfkörper 588  
 – ELS-Prüfkörper 581  
 – ENF-Prüfkörper 582  
 – FRMM-Prüfkörper 584  
 – MMB-Prüfkörper 585  
 Prüfkörperformen für Kunststoffe  
 – CT-Prüfkörper 252, 262, 423, 532, 695  
 – DENT-Prüfkörper 294  
 – Miniatur-CT-Prüfkörper 688  
 – SENB-Prüfkörper (3PB-Prüfkörper) 160, 251, 256, 273  
 – SENT-Prüfkörper 252  
 – Trapezprüfkörper 137  
 – Vielzweckprüfkörper (Zugprüfkörper) 24, 121, 142, 160, 416, 421, 533  
 – Winkelprüfkörper 137  
 Prüfkörpergeometrie 219, 251, 253, 257, 274, 365  
 Prüfkörperherstellung 17, 31, 116, 166, 555  
 Prüfkörpernachgiebigkeit 269  
 Prüfkörpervorbereitung 37, 371, 557  
 Prüfkörperzustand 20, 25, 34, 36, 114, 120  
 Pull-out 283, 662  
 Puls-Echo-Verfahren 105, 488, 490  
 Puls-Thermographie 509, 511, 517  
 PUR-Elastomer 660, 668  
 PUR-Hartschaumstoff 651, 652, 655, 657  
 Push-out Test 662f., 665  
 PVC-C 641, 644  
 PVC/Kreide-Verbund 130, 279, 282  
 PVC/SiO<sub>2</sub>-Verbund 279  
 Pyrolyse 611, 616, 624, 629, 631

## Q

Qualitätskriterien 639  
 Qualitätsmanagementsystem 9  
 Qualitätsmerkmale 529, 635, 637  
 Qualitätssicherung 17, 111, 117, 139, 146, 159, 314, 522, 570, 634, 641  
 Qualitätsüberwachung 70, 193, 211, 521, 642  
 Quarzglas 487  
 Quarzrohrdilatometer 320  
 Quasistatische Bruchmechanikexperimente 530, 539  
 Quasistatische Prüfverfahren 111, 640  
 Quellgleichgewicht 439  
 Quellung 439, 443

Querdehnungs-Längsdehnungs-Diagramm 123, 530  
 Querkontraktion 119, 134, 475, 547, 550  
 Querkontraktionszahl 84, 124, 476, 560, 685, 692  
 Querschering 579  
 Querspannung 573

## R

Radiografische Prüfmethode 36  
 Randdelaminationszähigkeit 588  
 Randfaserdehnung 151, 155, 191, 417, 567, 604  
 Randfaserdehnung beim Bruch 156  
 Rastersondenmikroskopie 692  
 Rauigkeit 26, 218, 324, 340, 344, 391  
 Räumlicher Spannungszustand 81  
 Reflektometerverfahren 342, 385, 390  
 Reflexion 324, 330, 339, 463, 467, 470, 480, 490, 512  
 Reflexionskoeffizient 463  
 Refraktion 324, 467, 469  
 Refraktionswert 468  
 Refraktometer 325, 327, 329  
 Registrierende Härteprüfeinrichtung 205  
 Reibung 96, 140, 152, 214, 216, 219, 226, 231, 429, 584  
 Reibungsgesetz 217  
 Reibungskennwert 218  
 Reibungskoeffizient 109, 215, 217, 224, 227, 230, 429  
 Reibungsprozess 107, 217  
 Reibungswärme 33, 217, 616  
 Reißdehnung 188  
 Reißfestigkeit 127  
 Reißmodul 261, 285, 288  
 Relative Luftfeuchtigkeit 37f.  
 Relaxationsgesteuertes Risswachstum 430  
 Relaxationsmechanismus 107, 114, 129  
 Relaxationsmodul 89, 189  
 Relaxationsprozesse 96, 107, 109, 115, 153, 372, 376, 378, 418  
 Relaxationsverhalten 90, 114, 135, 190, 205  
 Relaxationszeit 90, 96, 107, 376, 484  
 Relaxationszeitspektrum 67, 90, 92, 96  
 Remission 340, 348  
 Remissionsgrad 340, 349  
 Resonanzfrequenz 100, 103, 105, 502, 507  
 Resonanzschwingungen 99, 103  
 Restdehnung 418, 420  
 Restdruckfestigkeit 554, 594  
 Restfestigkeit 418, 420, 593  
 Retardation 97, 114, 182  
 Retardationsmechanismus 114, 129  
 Retardationsverhalten 90, 114, 135  
 Retardationsversuch 189  
 Retardationszeitspektrum 91f.  
 Rheologische Ansätze 47, 74, 87  
 Rheometer 53  
 Rheometrie 52  
 Rice 258, 264, 271

- Rieselfähigkeit von Schüttgut 46  
 Rissabstumpfung 260, 264 f.  
 Rissausbreitung 250, 255, 257, 261, 265, 580  
 – instabil 213, 248, 252, 255, 267, 296, 425  
 – stabil 254, 260, 283, 296, 423, 580  
 Rissausbreitungs geschwindigkeit 160, 423, 445, 453  
 Risseinleitung 291, 587  
 Rissfortschritt 257, 264, 424, 429, 531, 580  
 Rissinitiierung  
 – physikalische 256, 261, 539  
 – technische 261, 288, 291  
 Risslänge 251, 259, 283, 289, 581, 584, 681, 691  
 Rissmodell nach *Dugdale* 254  
 Rissöffnung 253, 255, 257, 275, 539, 581, 693, 695  
 Rissöffnungsarten 250, 253, 579  
 Rissöffnungsverschiebung 254, 257, 282, 285, 540, 542, 697  
 Rissorientierung 469  
 Rissspitze 138, 250, 253, 257, 260, 264, 273, 426, 430, 442, 445, 453, 539, 553, 583, 695, 698  
 Rissspitzendeformationsprozess 265, 539  
 Rissverzögerungsenergie 266, 270, 286  
 Risswachstumsuntersuchungen 254, 265, 449, 455, 540, 582  
 Risswiderstands-(R)-Kurven  
 – Elastomere 542  
 – E/P-Copolymer 286  
 – iPP-Blend 540  
 – PP/EPR/PE-Blends 290  
 – TPU/ABS-Blends 288  
 Risswiderstands-(R)-Kurven-Konzept 260  
 Risswiderstandsverhalten 261  
 Risszähigkeit 252, 260, 278, 287, 292, 553, 579  
 Ritzhärteprüfung 201  
*Rockwell*-Härte 197, 202  
 Röntgendurchstrahlungsprüfung 464, 484  
 Röntgenografische Spannungsmessung 35  
 Röntgen-Refraktions-Topogramm 468  
 Röntgen-Refraktometrie 36, 467  
 Röntgenröhre 466  
 Röntgenrückstreuverfahren 467  
 Röntgentomogramm 466  
 Rotationsfaktor 256  
 Rotationsrheometer 53  
 Rückwandecheo 488, 490  
 Rußgehalt 296, 542  
 Rutschwinkel 46
- S**
- Sandkastenversuch 659  
 Sandrieselprüfung 343  
 Sandwichbauelemente 635, 651, 655  
 Sandwich-Druckversuch 566  
 Sandwichlaminat 569, 590  
 Sauerstoff-Grenzkonzentration 613  
 Sauerstoffverbrauchs-Methode 625, 631  
 Schadenstoleranz 553, 592, 594  
 Schädigung 419, 485, 530, 533, 682, 699  
 Schädigungsarbeit 168, 248, 276  
 Schädigungsfläche 593, 595  
 Schädigungskinetik 530, 533, 607, 664  
 Schädigungsmerkmale 169  
 Schädigungswiderstand 593  
 Schälfestigkeit 590  
 Schälfestigkeit von Laminaten 590  
 Schallemission 498, 515, 533, 543, 665  
 Schallemissionsanalyse 132, 530, 532, 542, 664  
 Schallemissionsaufnehmer 663  
 Schallemissionsprüfung 530, 663  
 Schallgeschwindigkeit 105, 268, 307, 494  
 Schälversuch 590  
 Scherbandbildung 113, 423  
 Scherbänder 96, 119, 146, 247  
 Scherdeformation 48, 50, 429  
 Scherfestigkeit 117, 152, 557, 570 f., 574, 576, 578, 652, 657, 662  
 Schergeschwindigkeit 47, 49, 56, 58, 61, 74  
 Schermodul 85, 100, 105, 664  
 Scherspannung 80, 88, 663, 665  
 Scherung 663  
 Scherversagen 563  
 Scherviskosität 47, 50, 57, 73, 87  
 Scherwelle 491  
 Schlagarbeit 161, 163, 165, 294  
 Schlagbeanspruchung 159, 165, 170, 554, 583, 592, 594  
 Schlagbiegeversuch 159, 161, 165, 168, 266  
 Schlagenergie 160, 268, 276, 554, 593 f.  
 Schlagkraft 163, 266, 268, 276, 279, 282, 285, 294  
 Schlagkraft-Deformations-Diagramm 277, 670  
 Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramme 266  
 – Humanknorpel 669 f.  
 – Schematische 266, 270  
 – Werkstoffbeispiele 164, 286, 413, 543  
 Schlagprüfung 647, 669  
 Schlagversuch 121, 159, 248, 276, 592, 669  
 Schlagzähigkeit 161 f.  
 – *Charpy* 161, 164  
 Schlagzugversuch 159, 165, 167, 293  
 Schlagzugzähigkeit 166  
 Schlankheitsgrad 141  
 Schliffbilder 559, 639  
 Schmelzeelastizität 67  
 Schmelze-Massefließrate 420, 434  
 Schmelzen 47, 51, 64, 66, 70, 88, 210, 314, 337, 354, 438, 610  
 Schmelzenthalpie 306, 313  
 Schmelze-Volumenfließrate 69  
 Schmelzindex 68, 70, 638, 642  
 Schmelzindexmessung 68, 638  
 Schmelzpeak 315

- Schmelztemperatur 306, 314, 601  
 Schockprüfung 647  
 Schraubenauszugsversuch 652, 655  
 Schrumpfspannung 26  
 Schrumpfungsmessung 35  
 Schubbeanspruchung 556, 571  
 Schubdehnung 578, 582  
 Schubmodul 547, 571f., 577, 587f., 653  
 Schubspannung 47, 52, 56, 59, 62, 65, 70, 74, 80, 119, 150, 250, 567, 570, 572, 583  
 Schubspannungs-Scherungs-Kurve 571, 573, 576  
 Schubversagen 564  
 Schubversuche  
 – 10° Off-Axis Zugversuch 573, 587  
 – ± 45° Off-Axis Zugversuch 571, 587  
 – Iosipescu Schubversuch 575, 587  
 – Plate-Twist Schubversuch 576, 588  
 – Schertorsionsversuch dünnwandiger Rohre 577  
 – Two- und Three-Rail Scherversuche 574  
 Schüttdichte 44, 46  
 Schüttgut 44  
 Schüttwinkel 46  
 Schwächungskoeffizient 462  
 Schwefelgehalt 296  
 Schweißverbindung 170, 537  
 Schwelbrand 615  
 Schwindung 21, 29, 154, 320, 637, 642  
 Schwingende Beanspruchung 171, 181, 593, 684  
 Schwingenspielzahl 173f., 178  
 Schwingungsamplitude 101, 104, 501, 507  
 Schwingungsanalyse 462  
 Schwingungserreger 106  
 Schwingungsprüfung 647  
 Schwingungsspektroskopie 360  
 Schwingversuch 173  
*Searle*-Messsysteme 54, 59  
 Sekantenmodul 123, 143, 155  
 Selbstentzündung 611, 613  
 Selbstentzündungstemperatur 613  
 SENB-Prüfkörper 251, 256, 265, 273  
 SENT-Prüfkörper 252  
*Shore*-Härte 195, 200, 202  
 Signal/Rausch-Verhältnis 477, 494, 510, 518, 521  
 Silikonharz 130, 366  
 Silikonkautschuk 660, 666, 668  
 Skin-Effekt 486, 511  
 Slosh-Test 651  
 Spanende Formgebung 25, 29, 32  
 Spannung 79, 681, 691  
 Spannungsänderungsgeschwindigkeit 448  
 Spannungs-Dehnungs-Diagramm 23, 95, 123, 125, 131, 533, 535, 562, 588, 685  
 – Einfluss der Prüfgeschwindigkeit 129  
 – Einfluss der Temperatur 129  
 Spannungsdoppelbrechung 332  
 Spannungsgeregelter Dauerschwingversuch 172  
 Spannungsintensitätsfaktor 250, 252, 298, 423, 449, 697  
 Spannungskonzentration 138, 158, 166, 476, 478, 515, 531, 566, 680  
 Spannungsoptik 470, 473, 480  
 Spannungsrelaxation 89, 92, 97, 112, 114, 182, 189  
 Spannungsrisssbeständigkeit 189, 411, 415, 419, 423, 431, 437, 441, 446, 451, 453, 607  
 Spannungsrisssbildungsvorgang 414  
 Spannungsrisse 412, 417, 427, 435, 438, 445, 450, 453  
 Spannungsrissskorrosion 414  
 Spannungsrisssprüfung 36, 415, 419  
 Spannungsrisswiderstand 415, 430, 433, 436  
 Spannungssingularität 552  
 Spannungstensor 81, 83f., 258  
 Spannungsverteilung 141, 150, 470, 550  
 Spannungs-Zeit-Schaubild 172  
 Speichermodul 74, 100, 102, 104, 106, 109, 608  
 Spektraler Transmissionsgrad 339  
 Spektralphotometer 340  
 Spezifische Festigkeit 461  
 Spezifische Gleichstromleitfähigkeit 362  
 Spezifische Leitfähigkeit 357, 362  
 Spezifischer Durchgangswiderstand 359, 363, 365  
 Spezifischer Oberflächenwiderstand 359, 363  
 Spezifische Verschleißrate 218, 223, 225, 227, 230  
 Spezifische Wärmekapazität 307, 312, 314  
 Spezifische Wärmeleitfähigkeit 217  
 Sphärolithisches Gefüge 337  
 Spröd-Zäh-Übergangstemperatur 162, 278, 292  
 – instabil 282, 292  
 – stabil 290, 292  
 Stabile Rissausbreitung 254, 260, 283, 296, 423, 580  
 Stabile Rissinitiierung 543  
 Stabile Rissverlängerung 540  
 Standzeit 188, 416, 420, 422, 430, 432, 446, 643, 645, 658  
 Stanzen 30, 638  
 Stanzpresse 31  
 Stationäres plastisches Fließen 131  
 Statische Prüfverfahren 97, 111, 628, 640  
 Statischer Pressdruck 660  
 Stauchung 140, 142, 144, 193  
 Stauchung bei Druckfestigkeit 145  
 Stearinsäuremodifizierung 281  
 Steifigkeitstensor 84  
 Stereomikroskopie 541  
 Stifteindrückverfahren 416, 418  
 Stopfdichte 44  
 Stoßartige Beanspruchung 158  
 Strahlungswärme 616, 625, 631  
 Streckdehnung 128  
 Streckspannung 36, 95, 113, 126, 128, 130, 151, 254, 297  
 – dynamisch 271  
 – statisch 126, 211, 416, 452

Streifenprojektion 473  
 Stretchzone 257, 260, 542  
 – Stretchzonenhöhe 257, 540  
 – Stretchzonenweite 257, 260f.  
 Streukoeffizient 348, 464  
 Streulichtverteilung 342  
 Streuung 339, 348, 412, 462, 464, 496, 631, 634  
 Streuwinkel 468  
 Strömungswiderstand 447, 666  
 Struktur 34  
 Stützweite 151, 154, 156, 160, 256, 267, 270, 282, 604, 652  
 Styren-Butadien-Kautschuk-Vulkanist 296  
 Styrol-Acrylnitril 25, 130, 158, 164, 427, 442, 447, 604  
 Styrol-Butadien-Copolymere 111  
*Sumpter* 271

## T

*Tabor*-Beziehung 211  
 Tangentiale Scherfestigkeit 658  
 Tearing Modul 261, 285, 288  
 Teilchenabstand 167, 290  
 Teilchengefüllte Kunststoffe 278, 288  
 Teilchengröße 289, 322  
 Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit 267, 278, 282, 285, 292  
 Temperaturleitfähigkeit 308, 311, 510, 512, 520  
 Temperaturleitzahl 308  
 Temperaturmodulierte DSC 314, 316  
 Temperatursensor 312, 603  
 Temperaturspannungen 655  
 Temperaturvariationsmethode 327  
 Temperaturwechselbeanspruchungen 18, 655  
 Temperatur-Zeit-Grenzen 640, 672  
 Temperatur-Zeit-Superpositionsprinzip 92, 108  
 Thermische Alterung 658  
 Thermische Ausdehnung 319, 323, 477, 479, 516  
 Thermische Dehnungsanalyse 26  
 Thermische Eindringtiefe 512  
 Thermische Emission 532  
 Thermischer Abbau 611  
 Thermischer Ausdehnungskoeffizient 52, 321, 551, 692  
 Thermisches Langzeitverhalten 640  
 Thermische Spannungsanalyse 26  
 Thermische Tomographie 514, 518  
 Thermische Zuverlässigkeit 679  
 Thermo-elastischer Effekt 533  
 Thermoelastische Spannungsanalyse 515  
 Thermoelement-Methode 624, 629  
 Thermographie 36, 132, 176, 479, 509, 511, 513, 515, 517, 520, 530, 532  
 Thermogravimetrische Analyse 306, 317  
 Thermomechanische Analyse 307, 319, 321

Thermooptische Analyse 307  
 Three-Rail Scherversuch 571, 574  
 tie-Moleküle 18, 321, 435, 446  
 Torsion dünnwandiger Rohre 577  
 Torsionspendel-Versuch 101, 103  
 Torsionsschwingung 101  
 Torsionsschwingungsversuch 101, 249  
 Torsionsversuch 577  
 TPU/ABS-Blends 288  
 Trägheitshalbmesser 141  
 Trägheitskraft 57, 268, 270  
 Transienten-Thermographie 509  
 Transmission 339, 352, 493  
 Transmissionsgrad 339, 350  
 Transparenz 323, 337, 339, 348  
 Transversalwellen 463, 487  
 Trapezprüfkörper 137  
 Traversengeschwindigkeit 118, 130, 134, 139, 151, 154, 262, 582, 586, 588, 592, 594  
 Tribochemische Reaktion 218  
 Trommelschälversuch 590, 592  
*Trouton*'sche Viskosität 50, 87  
 Trübung 323, 339, 341, 344, 350  
 Trübungsmaß 350  
 Türangelmodell 256  
*Turner* 271  
 Two-Rail Scherprüfung 571, 574, 587

## U

*Ubbelohde*-Viskosimeter 60, 63  
 Übergangstemperatur 110, 306, 314, 380, 444, 608  
 Übermolekulare Struktur 195, 209  
 UD-Laminat 547, 560, 574, 580  
 UHMWPE-Werkstoffe 351, 604, 660  
*Ulbricht*'sche Kugel 350  
 Ultraschall 488, 503, 530  
 Ultraschallamplitude 491, 516  
 Ultraschall-Burst-Phasen-Thermographie 517, 519  
 Ultraschalldefektoskopie 530  
 Ultraschalldoppelbrechung 490  
 Ultraschallfrequenz 488, 519  
 Ultraschall-Prüfmethoden 36, 105, 488  
 Ultraschallreflexion 492  
 Ultraschallthermographie 515  
 Ultraschallwellen 99, 106, 478, 487  
 Ultraviolett-Leuchtstofflampe 355  
 Ungesättigtes Polyesterharz 30, 130, 147, 158, 164, 365, 605  
 Uniaxiale Mikrozugprüfung 682  
 Unterspannung 172  
 UP/GF-Verbund 201

## V

Verarbeitungsschwindigkeit 21, 637  
 Veraschung 19, 558, 639  
 Verbindungsmolekül 435  
 Verbrennung 609, 613, 624, 627, 629, 631, 633  
 Verbrennungswärme 613, 616, 624, 631  
 Verbrennungszyklus 611  
 Verbundfestigkeit 560  
 Verdrängungsdilatometer 320  
 Verfestigungsbereich 131  
 Verfestigungsexponent 126, 203  
 Verformungsenergie 247, 258, 265, 268, 271  
 Verformungsgeschwindigkeit 87, 138, 165, 293, 431, 446  
 Verformungstensor 84  
 Vergleichsspannung 642, 644  
 Vergleichsspannungshypothese 297  
 Verlustfaktor 100, 103, 105, 108, 111, 209, 307, 359, 362, 373, 375, 389, 485  
 Verlustmodul 74, 100, 102, 106, 108, 608  
 Vernetzung 34, 86, 182, 296, 305, 314, 358, 430, 432, 484  
 Vernetzungsdichte 86, 110  
 Vernetzungsgrad 116, 305  
 Versagenswahrscheinlichkeit 521  
 Verschleiß 214, 646  
 Verschleißkenngrößen 219  
 – Spezifische Verschleißrate 218, 223, 225, 227, 230  
 – Verschleißgeschwindigkeit 223  
 – Verschleiß-Weg-Verhältnis 223  
 Verschleißmechanismen 218, 222  
 Verstreckgrad 50  
 Verzerrungstensor 82  
 Verzweigung 430, 434  
 Vibrometrie 485, 498, 500, 502, 506, 508, 520  
 Vibro-Thermographie 515, 532  
*Vicat*-Erweichungstemperatur 25, 27, 602, 604, 607  
*Vicat*-Softening Temperature 25  
*Vickers*-Härte 195, 211, 214, 691  
*Vickers*-Pyramide 197, 202, 206, 211, 213  
 Videextensometrie 530, 541, 684  
 Videothermographie 530  
 Vielzweckprüfkörper 24, 38, 121, 132, 143, 160, 183, 416, 421, 533  
 Vierbalkenmikroprüfkörper 684  
 Vierpunktbiegeversuch 149, 567, 569, 584  
 Viskoelastische Eigenschaften 46, 52, 88, 106, 109, 203, 669  
 Viskoses Werkstoffverhalten 87  
 Viskosimetrie 52  
 Viskosität 47, 61, 116, 430, 441, 445, 450, 638  
 Viskositätsfunktion 67  
 Viskositätswert 50, 69, 295  
 Visuelle Prüfung 146, 418, 531, 636  
*Wogel-Fulcher-Tammann*-Gleichung 88, 380

*Voigt-Kelvin*-Modell 90  
 Volumendilatometrie 132, 530

## W

Wahre Dehnung 82, 134, 136  
 Warmauslagerungsversuch 637, 641f.  
 Wärmeausdehnung 319, 321  
 Wärmeausdehnungskoeffizient 307, 319  
 Wärmedehnzahl 319, 322  
 Wärmedurchgang 309  
 Wärmedurchgangszahl 309  
 Wärmedurchschlag 394  
 Wärmeeindringzahl 308  
 Wärmefluss 612, 623, 630  
 Wärmeflussverfahren 532  
 Wärmeformbeständigkeit 30, 147, 209, 601, 604f., 607, 609  
 – Heat Distortion Temperature 25, 603f., 608  
 – *Vicat*-Softening Temperature 25, 27, 601, 604, 607  
 Wärmefreisetzungsrates 617, 623, 625, 630f.  
 Wärmekapazität 307, 312, 314  
 Wärmeleitfähigkeit 36, 171, 217, 227, 307, 512, 532, 656  
 Wärmeleitungsgleichung 308  
 Wärmeleitzahl 307  
 Wärmequellen 37, 311, 478, 520, 610, 613, 616  
 Wärmestrom 514, 616, 621, 625, 657  
 Wärmestromdichteamplitude 512  
 Wärmestromprinzip 312  
 Wärmetransport 307, 477, 509, 511, 519  
 Wärmeübergangszahl 309  
 Wasserstrahlschneiden 33  
 Weather-Ometer 355  
 Wechselbereich bei Ermüdung 172  
 Wechselfestigkeit 180f.  
 Wechselstromleitfähigkeit 381  
 Wechseltemperaturtest 651  
 Weibull-Parameter 176, 179, 682  
 Weiterreiβversuch 117, 137  
 Weiterreiβwiderstand 137  
 Weitwinkellichtstreuung 349  
 Wellenlänge 36, 103, 105, 324, 328, 333, 343, 350, 384, 463, 479  
 Wellenlängenausbreitungsgeschwindigkeit 487  
 Wellenlängenvariationsmethode 325, 327  
 Wellenzahl 352, 462  
 Werkstoffauswahl 117, 202, 222, 297, 299, 368, 412, 648  
 Wickeltechnologie 556  
*Williams, Landel und Ferry*-Gleichung 52, 93, 380  
 Winkelprüfkörper 137  
 Wirbelstromprüfung 485, 512, 514  
 Witterungsbeständigkeit 355  
*Wöhler*-Kurve 173f., 177, 179  
*Wollaston*-Prisma 344

## X

Xenonbogenlampe 355  
 Xenontestgerät 355

## Z

Zähigkeitsbewertung 247, 278, 297, 552  
 Zeitdehnlagen 184  
 Zeitschwingfestigkeit 178  
 Zeitstandbiegeversuch 190  
 Zeitstanddruckversuch 192  
 Zeitstandinnendruck-Diagramm 644  
 Zeitstandinnendruckfestigkeit 642f.  
 Zeitstandinnendruck-Versuch 643, 645  
 Zeitstandschaubild 184  
 - Biegung 191  
 - Zug 185  
 Zeitstandzugfestigkeit 188, 416, 432, 436, 438, 440,  
 442, 452  
 Zeitstandzugversuch 183, 416, 421, 427, 434, 436, 445,  
 447, 450  
 Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip 92, 109

Zersetzung 218, 306, 314, 317, 319, 610, 612, 629  
 Zersetzungstemperatur 610, 612  
 Zerstörungsfreie Kunststoffprüfung 333, 461, 522,  
 539  
 Zugbeanspruchung 183, 189, 212, 435, 531, 534, 541,  
 556, 560  
 Zug/Druckbeanspruchung 181  
 Zugfestigkeit 23, 114, 127, 130, 560, 566  
 Zug-Kriechmodul 185  
 Zugschwellbereich bei Ermüdung 172  
 Zugspannung 72, 126, 212, 323, 416, 422  
 Zugspannungs-Dehnungs-Diagramme 212  
 Zugversuch  
 - Kenngröße 124, 130, 560  
 - Prüfkörper 122  
 - Theoretische Grundlagen 117  
 Zugwechselbeanspruchung 181  
 zulässige Dehnungen 297  
 zulässige Spannungen 297, 606  
 Zündflamme 619  
 Zündquelle 610, 613, 616, 619f.  
 Zuverlässigkeitsprüfung 679, 696, 698