

Kunststoffprüfung

Bearbeitet von
Wolfgang Grellmann, Sabine Seidler

3., aktualisierte Auflage 2015. Buch. 760 S.

ISBN 978 3 446 44350 1

Format (B x L): 17,9 x 24,7 cm

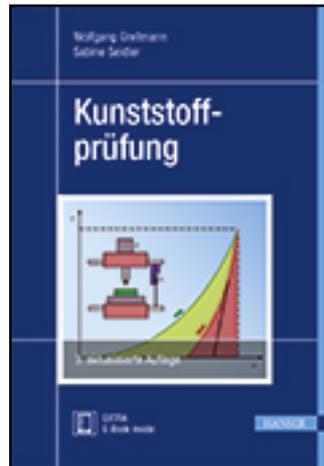
Gewicht: 1490 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Werkstoffkunde, Mechanische Technologie > Werkstoffprüfung](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.



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

Vorwort zur 3. Auflage	V
Vorwort zur 2. Auflage	VI
Vorwort zur 1. Auflage	VIII
Die Herausgeber	XI
Wolfgang Grellmann	XI
Sabine Seidler	XI
Mitautoren	XII
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen (Auswahl)	XXV
Abkürzungsverzeichnis	XXXVII
Kurzzeichen für Kunststoffe	XLI
1 Einleitung	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
2 Prüfkörperherstellung	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
3	Bestimmung verarbeitungsrelevanter Eigenschaften	43
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
4	Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen	79
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
5	Zähigkeitsbewertung mit bruchmechanischen Methoden	247
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
6	Prüfung physikalischer Eigenschaften	305
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
7	Bewertung der Spannungsrisssbeständigkeit	411
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
8	Zerstörungsfreie Kunststoffprüfung	461
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
9	Hybride Verfahren der Kunststoffdiagnostik	529
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
10	Prüfung von Verbundwerkstoffen	547
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° 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
11	Technologische Prüfverfahren	601
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
12	Mikroprüftechnik	679
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
	Sachwortverzeichnis	701

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 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) 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

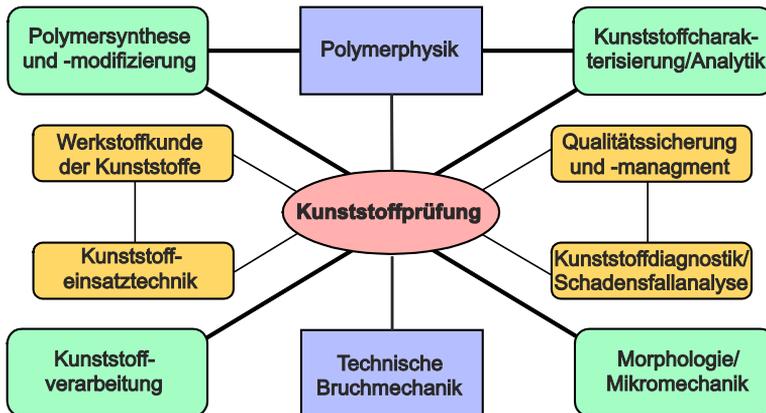


Bild 1.1 Der interdisziplinäre Charakter der Kunststoffprüfung

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 ΔL_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.

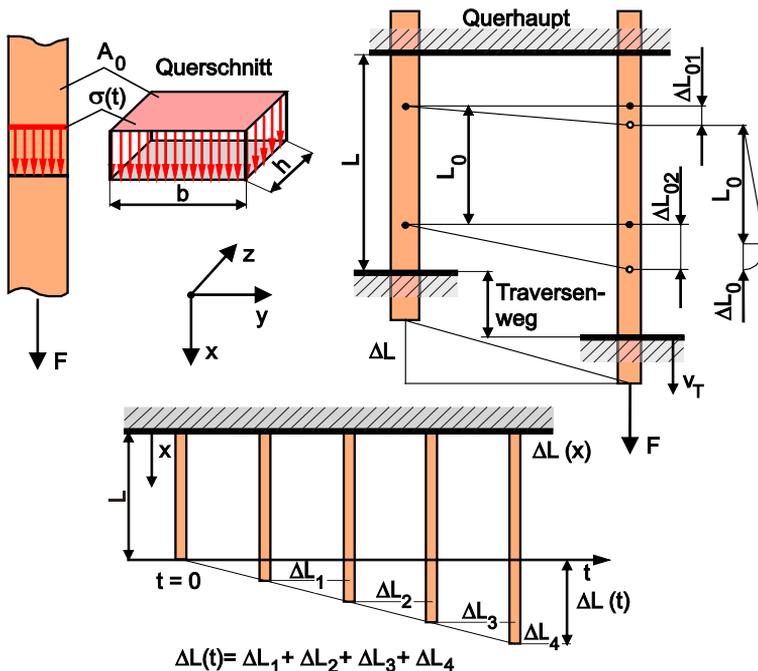


Bild 4.24 Zeitliches und örtliches Verformungsverhalten im Zugversuch

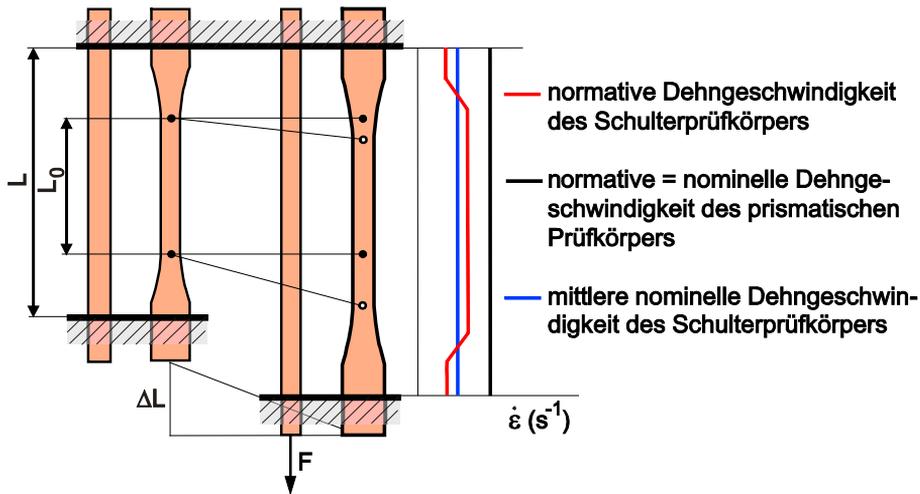


Bild 4.25 Vergleich der Dehngeschwindigkeiten des Schulterprüfkörpers und des prismatischen Prüfkörpers

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.

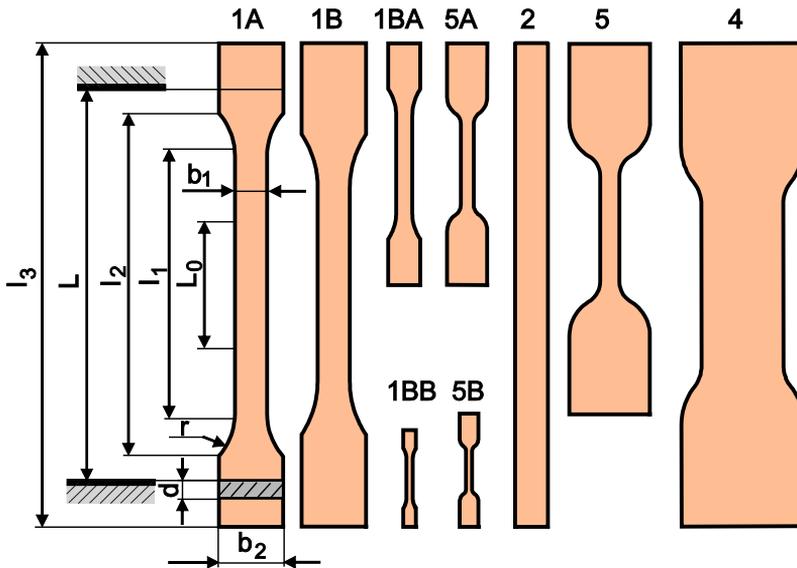


Bild 4.26 Prüfkörper für den Zugversuch an Kunststoffen nach DIN EN ISO 527

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
		Maße in mm	
l_3	Gesamtlänge	≥ 150	
l_1	Länge des schmalen parallelen Teils	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r	Radius	$20 - 25$	≥ 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 ± 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):

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

σ_{ij} Normal- bzw. Schubspannungen
 r, Θ Polarkoordinaten mit der Risspitze als Ursprung
 g_{ij} dimensionslose Funktion

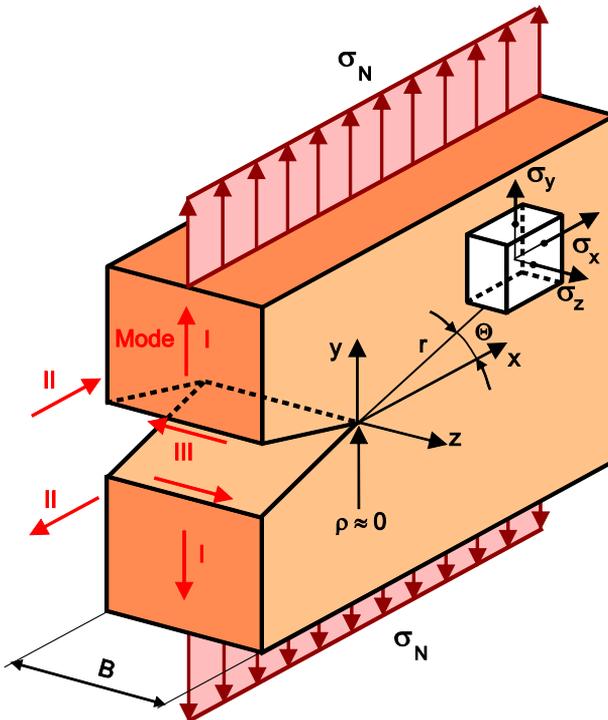


Bild 5.1
 Koordinatensystem zur
 Beschreibung des Spannungszustandes an der Risspitze

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

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

σ_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 $f(a/W) = 1$.

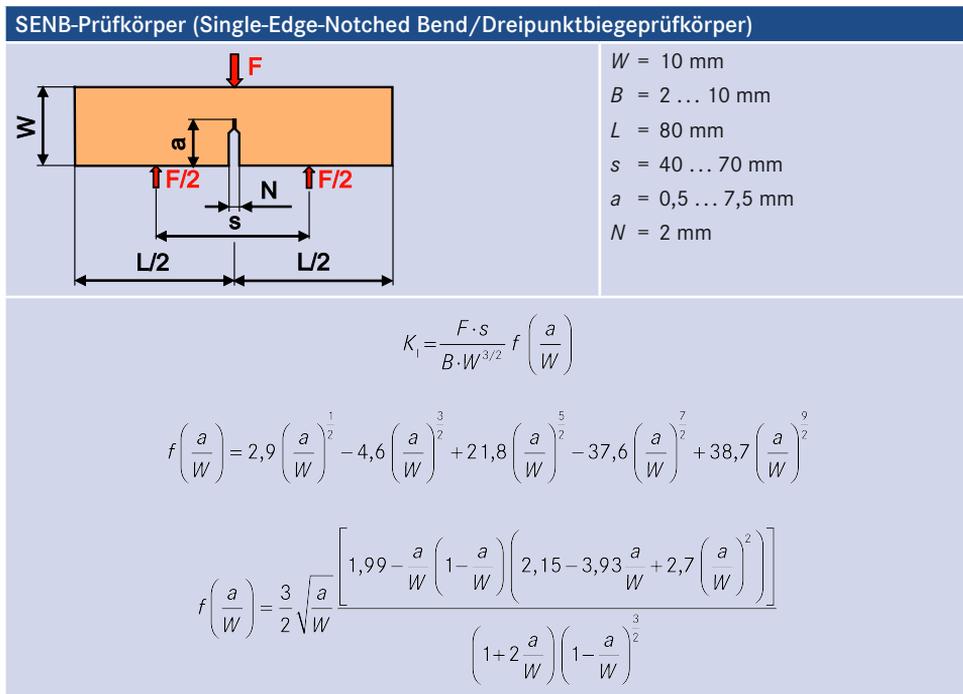


Bild 5.2 Zusammenstellung häufig verwendeter Prüfkörperformen mit ihren Abmessungen, den dazugehörigen Bestimmungsgleichungen zur Berechnung der Bruchzähigkeiten und den Geometriefunktionen

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 Energiefreisetzungsrate 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.

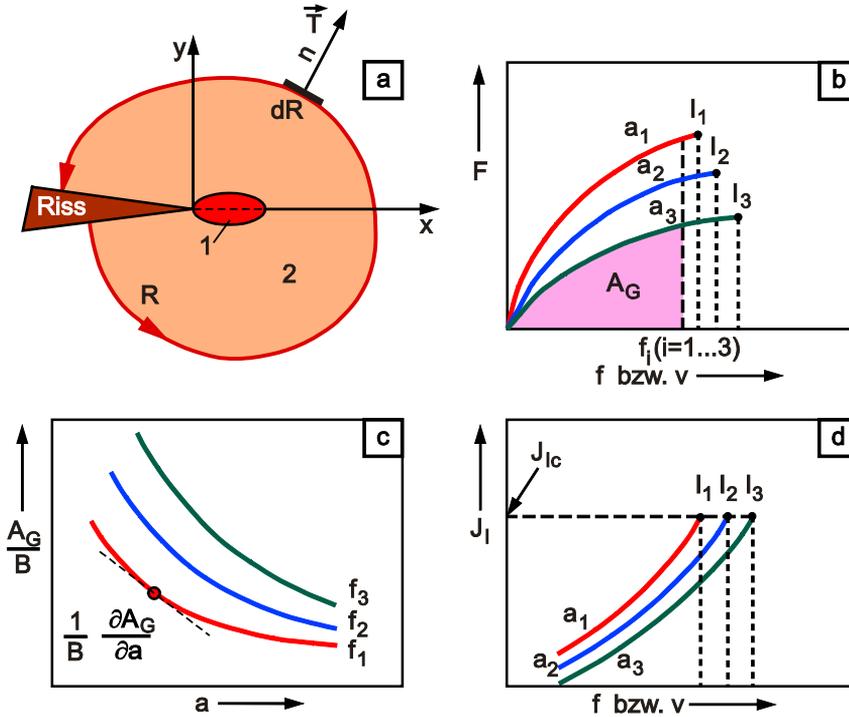


Bild 5.9 Bestimmung des J -Integrals: wegunabhängiges Linienintegral mit 1 plastisch deformierter Bereich (energie-dissipative Zone) und 2 elastisch deformierter Bereich (a), experimentell ermittelte Kraft-Kraftangriffspunktverschiebungs-Kurven unterschiedlicher Risslänge (b), durch Planimetrieren der $F = f(v, f)$ -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:

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

ε werkstoffabhängige Konstante des Geometrikriteriums des J -Integral-Konzeptes

erfüllt ist.

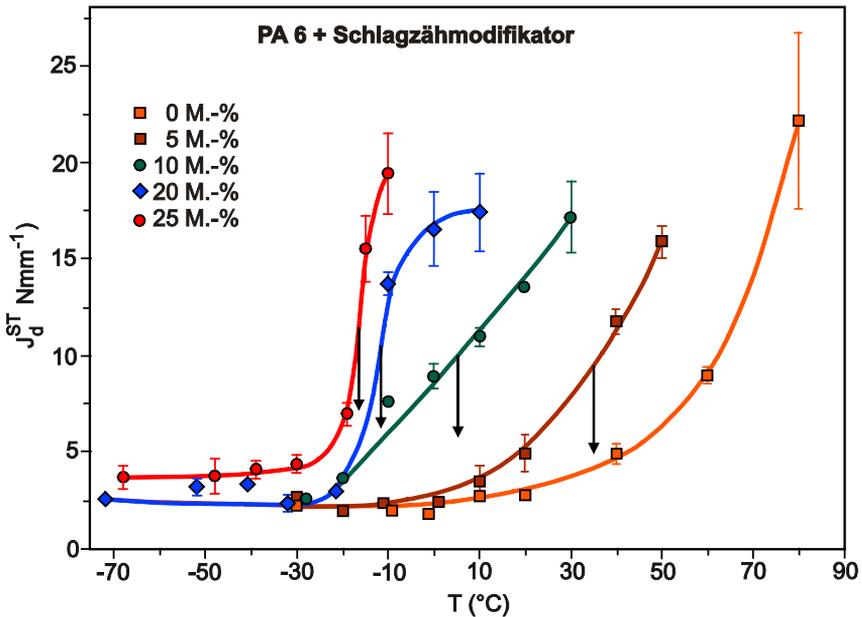


Bild 5.24 Temperaturabhängigkeit der J -Werte von schlagzähmodifiziertem PA 6; die Pfeile kennzeichnen die Spröd-Zäh-Übergangstemperaturen

■ 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 φ_v für kreidegefülltes PP, baumwoll- (BW), hartpapier- (HP) bzw. SiO_2 -gefülltes PE-HD sowie für kreide- und SiO_2 -gefülltes PVC dargestellt. Dabei zeigt sich ein charakteristisches Maximum für bestimmte φ_v . Zur Aufklärung der Ursachen der Konzentrationsabhängigkeit ist der spezifische Verlauf der einzelnen Messgrößen von Schlagkraft und Durchbiegung in Abhängigkeit von φ_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/ 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.

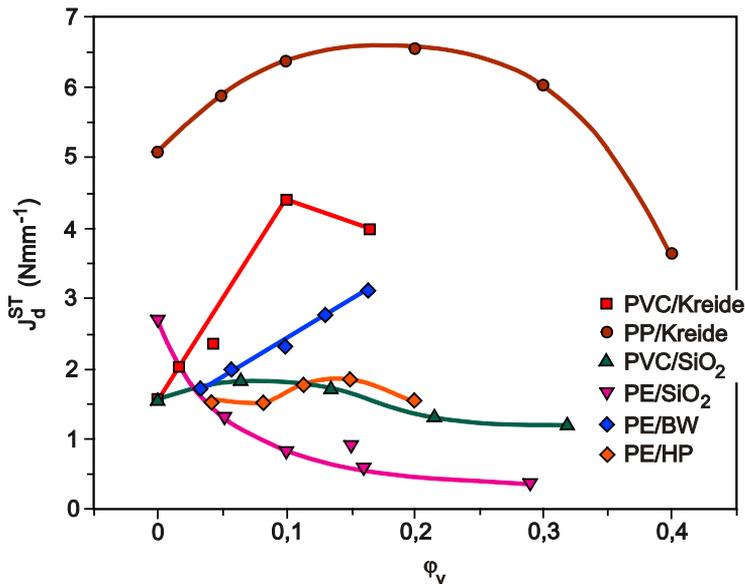


Bild 5.25 Abhängigkeit der J -Werte vom Füllstoffvolumenanteil φ_v für thermoplastische Verbundwerkstoffe

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 Aufsichtfarbbestimmung 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.

Farbbestimmung 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.

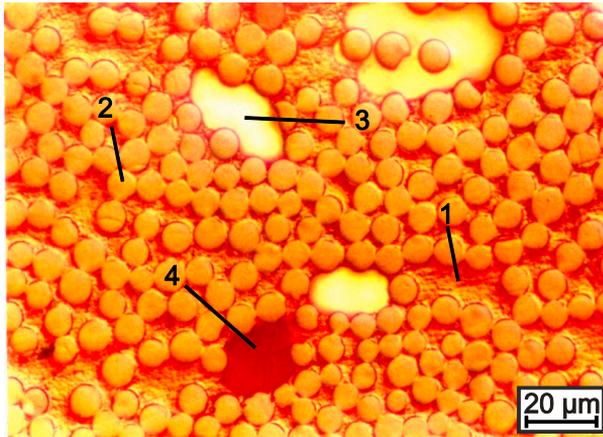


Bild 6.30 Gefüge eines EP/GF-Verbundes senkrecht zur Faserorientierung, ermittelt im Auflicht bei Dunkelfeldbeleuchtung (1 Matrix, 2 Glasfaser, 3 Fremdeinschlüsse, 4 Lunker)

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

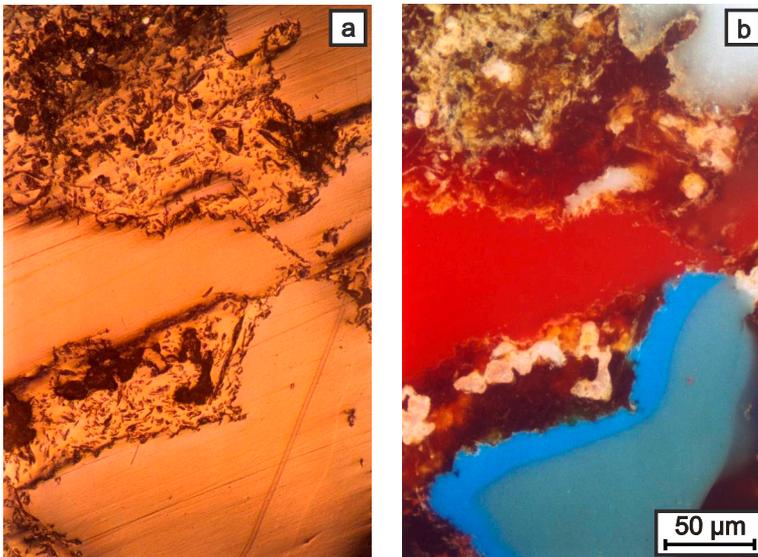


Bild 6.31 Anschliff eines holzmehlgefüllten Polyolefinmaterials im Auflicht bei Hellfeld- (a) und Dunkelfeldbeleuchtung (b)

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 ν 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.

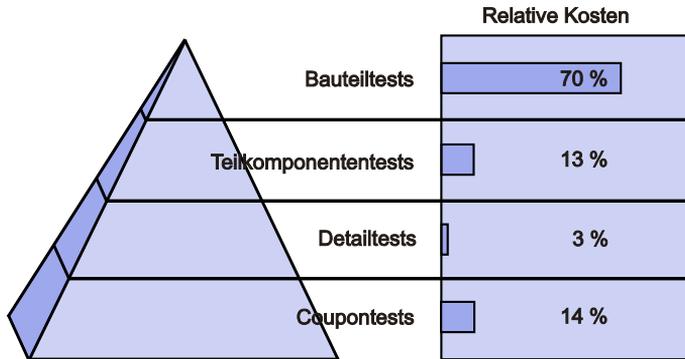


Bild 10.1 Zulassungsprüfungen in Abhängigkeit der Prüfkörperanzahl und der relativen Kosten [10.1]

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

δ - Δ -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
 Defektortung (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, 609
 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-SiO₂-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
 Halbleiterdehnungstreifen 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- Δ -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
 Lasertextensometrie 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/SiO₂-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/SiO₂-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
 Spannungsrissebeständigkeit 189, 411, 415, 419, 423, 431, 437, 441, 446, 451, 453, 607
 Spannungsrissebildungsvorgang 414
 Spannungsrisse 412, 417, 427, 435, 438, 445, 450, 453
 Spannungsrissekorrosion 414
 Spannungsrisseprüfung 36, 415, 419
 Spannungsrissewiderstand 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
 Zeitdehnlinien 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