

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 <i>nicht-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	Dehnrrheometer	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 Mikrohärte 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	<i>J</i> -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 <i>J</i> -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 Copolymer	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 Spannungsrißbeständigkeit	411
7.1	Allgemeine Bemerkungen zum Versagen von Kunststoffen in aggressiven Medien	411
7.2	Prüfung der Spannungsrißbeständigkeit	415
7.2.1	Prüfmethoden zur Bestimmung der umgebungsbedingten Spannungsrißbildung	415

7.2.2	Beispiele zur Bewertung der Spannungsrißbeständigkeit 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 Spannungsrißverhalten	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 Prüfmethoden	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 Prüfmethoden	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 Prüfmethoden	588
10.7.1	Edge-Delamination Test (EDT)	588
10.7.2	Boeing Open-Hole Compression Prüfung	589
10.8	Schälfestigkeit biegeweicher Laminate	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 Wärmeformbeständigkeits temperatur <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 Schwellbrand	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	Löslichkeit	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	Basisprüfmethoden	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 Zeitstandinnendrucks 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