

Inhalt

Vorwort zur 4. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	VII
Die Herausgeber	IX
Wolfgang Grellmann	IX
Sabine Seidler	X
Mitautoren	X
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	11
2 Prüfkörperherstellung	15
2.1 Einführung	15
2.2 Prüfung an Formmassen	17

2.3	Herstellung von Prüfkörpern	18
2.3.1	Allgemeine Anmerkungen	18
2.3.2	Prüfkörperherstellung durch direkte Formgebung	20
2.3.2.1	Herstellung von Prüfkörpern aus thermoplastischen Formmassen	20
2.3.2.2	Herstellung von Prüfkörpern aus duroplastischen Formmassen	27
2.3.2.3	Herstellung von Prüfkörpern aus elastomeren Werkstoffen	28
2.3.3	Prüfkörperherstellung durch indirekte Formgebung	30
2.3.4	Charakterisierung des Prüfkörperzustandes	32
2.4	Prüfkörpervorbereitung und Konditionierung	35
2.5	Zusammenstellung der Normen	38
2.6	Literatur	40
3	Bestimmung verarbeitungsrelevanter Eigenschaften	41
3.1	Formmassen	41
3.2	Bestimmung von Schüttguteigenschaften	42
3.2.1	Schüttdichte, Stopfdichte, Füllfaktor	43
3.2.2	Rieselfähigkeit, Schüttwinkel, Rutschwinkel	44
3.3	Bestimmung von Fluideigenschaften	45
3.3.1	Rheologische Grundlagen	45
3.3.1.1	Viskosität <i>Newton'scher</i> und nicht- <i>Newton'scher</i> Fluide ..	45
3.3.1.2	Temperatur- und Druckabhängigkeit der Viskosität	48
3.3.1.3	Einfluss der molaren Masse auf die Viskosität	49
3.3.1.4	Volumeneigenschaften	49
3.3.2	Messung rheologischer Eigenschaften	50
3.3.2.1	Rheometrie/Viskosimetrie	50
3.3.2.2	Rotationsrheometer	51
3.3.2.3	Kapillarrheometer	57
3.3.2.4	Dehnrheometer	68
3.3.3	Auswahl von Messmethoden zur rheologischen Charakterisierung von Polymerwerkstoffen	70
3.4	Zusammenstellung der Normen	72
3.5	Literatur	73
3.5.1	Weiterführende Literatur	73

4	Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen	75
4.1	Grundlagen mechanischen Verhaltens	75
4.1.1	Mechanische Beanspruchungsgrößen	75
4.1.1.1	Spannung	75
4.1.1.2	Deformation	78
4.1.2	Werkstoffverhalten und Stoffgesetze	79
4.1.2.1	Elastisches Verhalten	80
4.1.2.2	Viskoses Verhalten	82
4.1.2.3	Viskoelastisches Verhalten	84
4.1.2.4	Plastisches Verhalten	90
4.2	Mechanische Spektroskopie	92
4.2.1	Experimentelle Bestimmung zeitabhängiger mechanischer Eigenschaften	92
4.2.1.1	Statische Prüfverfahren	93
4.2.1.2	Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA)	94
4.2.2	Zeit- und Temperaturabhängigkeit der viskoelastischen Eigenschaften	101
4.2.3	Strukturelle Einflussgrößen auf die viskoelastischen Eigenschaften	105
4.3	Quasistatische Prüfverfahren	106
4.3.1	Deformationsverhalten von Kunststoffen	106
4.3.2	Zugversuch an Kunststoffen	112
4.3.2.1	Theoretische Grundlagen des Zugversuches	112
4.3.2.2	Der konventionelle Zugversuch	116
4.3.2.3	Erweiterte Aussagemöglichkeiten des Zugversuches	125
4.3.3	Weiterreißversuch	131
4.3.4	Druckversuch an Kunststoffen	133
4.3.4.1	Theoretische Grundlagen des Druckversuchs	133
4.3.4.2	Durchführung und Auswertung des Druckversuches	136
4.3.5	Biegeversuch an Kunststoffen	141
4.3.5.1	Theoretische Grundlagen des Biegeversuches	141
4.3.5.2	Der genormte Biegeversuch	147
4.4	Schlagartige Beanspruchung	151
4.4.1	Einführung	151
4.4.2	Schlagbiegeversuch und Kerbschlagbiegeversuch	152

4.4.3	Schlagzugversuch und Kerbschlagzugversuch	158
4.4.4	Fallbolzenversuch und Durchstoßversuch	161
4.5	Ermüdungsverhalten	164
4.5.1	Allgemeine Grundlagen	164
4.5.2	Experimentelle Ermittlung des Ermüdungsverhaltens	166
4.5.3	Planung und Auswertung von Ermüdungsversuchen	170
4.5.4	Einflussgrößen auf das Ermüdungsverhalten und die Lebensdauervorhersage von Kunststoffen	172
4.6	Statisches Langzeitverhalten	175
4.6.1	Allgemeine Grundlagen	175
4.6.2	Zeitstandzugversuch	176
4.6.3	Zeitstandbiegeversuch	183
4.6.4	Zeitstanddruckversuch	184
4.7	Härteprüfverfahren	186
4.7.1	Grundlagen der Härteprüfung	186
4.7.2	Konventionelle Härteprüfverfahren	188
4.7.2.1	Prüfverfahren zur Ermittlung von Härtewerten nach Entlastung	188
4.7.2.2	Prüfverfahren zur Ermittlung von Härtewerten unter Last	191
4.7.2.3	Sonderverfahren	194
4.7.2.4	Vergleichbarkeit von Härtewerten	195
4.7.3	Instrumentierte Härteprüfung	196
4.7.3.1	Grundlagen der Messmethodik	196
4.7.3.2	Werkstoffkenngrößen der instrumentierten Härteprüfung	198
4.7.3.3	Anwendungsbeispiele	201
4.7.4	Korrelationen der Mikrohärtigkeit mit Streckgrenze und Zähigkeit ...	203
4.8	Reibung und Verschleiß	207
4.8.1	Einleitung	207
4.8.2	Grundlagen von Reibung und Verschleiß	208
4.8.2.1	Reibungskräfte	209
4.8.2.2	Temperaturerhöhung als Folge der Reibung	209
4.8.2.3	Verschleiß als Systemeigenschaft	210
4.8.2.4	Verschleißmechanismen und Transferfilmbildung	211

4.8.3	Verschleißprüfung und Verschleißkenngrößen	212
4.8.3.1	Ausgewählte Modell-Verschleißprüfungen	213
4.8.3.2	Verschleißkenngrößen und deren Ermittlung	215
4.8.3.3	Verschleißkenngrößen und deren Darstellung	216
4.8.4	Ausgewählte experimentelle Ergebnisse	217
4.8.4.1	Einfluss des Gegenpartners	217
4.8.4.2	Einfluss von Füllstoffen	218
4.8.4.3	Einfluss der Belastungsparameter	220
4.8.4.4	Eigenschaftsvorhersage mittels neuronaler Netze	221
4.8.5	Abschließende Bewertung	223
4.9	Zusammenstellung der Normen	224
4.10	Literatur	231
5	Zähigkeitsbewertung mit bruchmechanischen Methoden ...	237
5.1	Einführung	237
5.2	Stand und Entwicklungstendenzen	238
5.3	Grundaussagen bruchmechanischer Konzepte	240
5.3.1	Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM)	240
5.3.2	Crack Tip Opening Displacement-(CTOD-)Konzept	244
5.3.4	Risswiderstands-(R-)Kurven-Konzept	250
5.4	Experimentelle Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte	251
5.4.1	Quasistatische Beanspruchung	251
5.4.2	Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch	255
5.4.2.1	Prüfanordnung	255
5.4.2.2	Einhaltung experimenteller Bedingungen	256
5.4.2.3	Typen von Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagrammen – Optimierung der Diagrammform	259
5.4.2.4	Spezielle Näherungsverfahren zur Bestimmung von J-Werten	261
5.4.2.5	Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie	264
5.4.3	Instrumentierter Fallversuch	266
5.5	Anwendungen in der Werkstoffentwicklung	268
5.5.1	Bruchmechanische Zähigkeitsbewertung von modifizierten Kunststoffen	268
5.5.1.1	Teilchengefüllte Kunststoffe	268

5.5.1.2	Faserverstärkte Kunststoffe	272
5.5.1.3	Blends und Copolymere	277
5.5.2	Anwendung des instrumentierten Schlagzugversuchs zur Erzeugnisbewertung	282
5.5.3	Berücksichtigung des Bruchverhaltens bei der Werkstoffauswahl und Dimensionierung	286
5.6	Zusammenstellung der Normen	288
5.7	Literatur	289
6	Prüfung physikalischer Eigenschaften	293
6.1	Thermische Eigenschaften	293
6.1.1	Einleitung	293
6.1.2	Wärmeleitfähigkeitsbestimmung	295
6.1.3	Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)	299
6.1.4	Thermogravimetrische Analyse (TGA)	305
6.1.5	Thermomechanische Analyse (TMA)	307
6.2	Optische Eigenschaften	311
6.2.1	Einführung	311
6.2.2	Reflexion und Brechung	311
6.2.2.1	Gerichtete und diffuse Reflexion	311
6.2.2.2	Brechzahlbestimmung	312
6.2.3	Dispersion	316
6.2.4	Polarisation	317
6.2.4.1	Optische Aktivität	317
6.2.4.2	Polarisationsoptische Bauelemente	318
6.2.4.3	Polarisationsoptische Untersuchungsverfahren	319
6.2.5	Transmission, Absorption und Reflexion	326
6.2.6	Glanz, Innere Remission und Trübung	328
6.2.7	Farbe	331
6.2.8	Transparenz und Durchsichtigkeit	335
6.2.9	Infrarotspektroskopie	338
6.2.10	Lasertechnik	340
6.2.11	Prüfung auf die Konstanz optischer Werte	341
6.3	Elektrische und dielektrische Eigenschaften	343
6.3.1	Einleitung	343

6.3.2	Physikalische Grundlagen	347
6.3.3	Elektrische Leitfähigkeit und Widerstand	350
6.3.3.1	Durchgangswiderstand	351
6.3.3.2	Oberflächenwiderstand	353
6.3.3.3	Isolationswiderstand	355
6.3.3.4	Kontaktierung und Prüfkörpervorbereitung	358
6.3.4	Dielektrische Eigenschaften und dielektrische Spektroskopie	359
6.3.4.1	Relaxationsprozesse	359
6.3.4.2	Wechselstromleitfähigkeit	367
6.3.4.3	Breitbandige dielektrische Messtechnik	369
6.3.5	Spezielle technische Prüfverfahren	376
6.3.5.1	Elektrostatische Aufladung	376
6.3.5.2	Elektrische Festigkeit	378
6.3.5.3	Kriechstromfestigkeit und Lichtbogenfestigkeit	382
6.4	Zusammenstellung der Normen	385
6.5	Literatur	390
7	Bewertung der Spannungsrisssbeständigkeit	395
7.1	Allgemeine Bemerkungen zum Versagen von Kunststoffen in aggressiven Medien	395
7.2	Prüfung der Spannungsrisssbeständigkeit	399
7.2.1	Prüfmethoden zur Bestimmung der umgebungsbedingten Spannungsrisssbildung	399
7.2.2	Beispiele zur Bewertung der Spannungsrisssbeständigkeit mit standardisierten Prüfverfahren	403
7.2.3	Bruchmechanische Prüfmethoden	407
7.3	Modellbetrachtungen zum Versagen von Kunststoffen in Medien durch Spannungsrisse	411
7.4	Einflussgrößen auf das Spannungsrisssverhalten	415
7.4.1	Vernetzung	415
7.4.2	Molare Masse und deren Verteilung	416
7.4.3	Verzweigungen	418
7.4.4	Kristalline Bereiche	419
7.4.5	Molekülorientierung	421
7.4.6	Physikalisch-chemische Wechselwirkungsvorgänge	423
7.4.7	Viskosität des Umgebungsmediums	430

7.4.8	Einfluss der Prüfkörperdicke	435
7.4.9	Einfluss der Temperatur	436
7.5	Zusammenstellung der Normen und Richtlinien	440
7.6	Literatur	441
8	Zerstörungsfreie Kunststoffprüfung	445
8.1	Einleitung	445
8.2	Zerstörungsfreie Prüfung mit elektromagnetischen Wellen	447
8.2.1	Röntgenstrahlung	447
8.2.1.1	Projektionsverfahren mittels Absorption	448
8.2.1.2	Compton-Rückstreuung	450
8.2.1.3	Röntgen-Refraktometrie	451
8.2.2	Spektralbereich des sichtbaren Lichts	454
8.2.2.1	Dickenmessung an transparenten Bauteilen	454
8.2.2.2	Spannungsoptik an transparenten Bauteilen	454
8.2.2.3	Konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie	455
8.2.2.4	Streifenprojektion zur Konturerfassung	456
8.2.2.5	Interferometrische Verfahren	457
8.2.3	Thermographie	463
8.2.4	Mikrowellen	463
8.2.5	Dielektrische Spektroskopie	467
8.2.6	Wirbelstrom	469
8.3	Zerstörungsfreie Prüfung mit elastischen Wellen	470
8.3.1	Elastische Wellen bei linearem Werkstoffverhalten	471
8.3.1.1	Ultraschall	471
8.3.1.2	Mechanische Vibrometrie	482
8.3.2	Elastische Wellen bei nichtlinearem Werkstoffverhalten	486
8.3.2.1	Grundlegendes zu elastischen Wellen im nichtlinearen Werkstoff	486
8.3.2.2	Nichtlinearer Luftultraschall	486
8.3.2.3	Nichtlineare Vibrometrie	489
8.4	Zerstörungsfreie Prüfung mit dynamischem Wärmetransport	492
8.4.1	Externe Anregung	492
8.4.1.1	Wärmeﬂussthermographie mit nichtperiodischem Wärmetransport	492
8.4.1.2	Thermographie mit periodischem Wärmetransport	494

8.4.2	Interne Anregung	498
8.4.2.1	Thermographie mit Anregung durch elastische Wellen ..	498
8.4.2.2	Thermographie mit anderen internen Anregungsarten ..	503
8.5	Ausblick	504
8.6	Literatur	506
9	Hybride Verfahren der Kunststoffdiagnostik	511
9.1	Zielstellung	511
9.2	Zugversuch, Schallemissionsprüfung und Videothermographie	513
9.3	Zugversuch und Laserextensometrie	516
9.4	Bruchmechanik und Zerstörungsfreie Prüfung	521
9.5	Literatur	525
10	Prüfung von Verbundwerkstoffen	527
10.1	Einführung	527
10.2	Theoretischer Hintergrund	529
10.2.1	Anisotropie	529
10.2.2	Elastische Eigenschaften von Laminaten	530
10.2.3	Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur	530
10.2.4	Laminattheorie und Hauptsatz nach <i>St. Venant</i>	531
10.2.5	Anwendung Bruchmechanischer Konzepte für FVW	532
10.3	Prüfkörperherstellung	534
10.3.1	Laminatherstellung	534
10.3.2	Prüfkörpervorbereitung für unidirektionale Beanspruchung	536
10.4	Bestimmung des Faservolumengehalts	538
10.5	Mechanische Prüfmethoden	539
10.5.1	Zugversuche	539
10.5.2	Druckversuche	543
10.5.3	Biegeversuche	546
10.5.4	Interlaminare Scherfestigkeit	549
10.5.5	Schubversuche	550
10.5.5.1	$\pm 45^\circ$ Off-Axis Zugversuch	551
10.5.5.2	10° Off-Axis Zugversuch	552
10.5.5.3	Two- und Three-Rail Scherversuche	553
10.5.5.4	<i>Iosipescu</i> Schubversuch	555

10.5.5.5	Plate-Twist Schubversuch	556
10.5.5.6	Torsion dünnwandiger Rohre	557
10.6	Bruchmechanische Prüfmethoden	559
10.6.1	Experimentelle Prüfung von FVW	559
10.6.2	Spezielle Prüfkörperformen	560
10.6.2.1	Prüfkörper für Mode I-Beanspruchung	560
10.6.2.2	Prüfkörper für Mode II-Beanspruchung	561
10.6.2.3	Mixed Mode-Prüfkörper	564
10.6.3	Bruchmechanische Kennwerte von FVW	566
10.7	Spezifische Prüfmethoden	568
10.7.1	Edge-Delamination Test (EDT)	568
10.7.2	Boeing Open-Hole Compression Prüfung	569
10.8	Schälfestigkeit biegeweicher Lamine	570
10.9	Schlagbeanspruchung und Schadenstoleranz	571
10.10	Zusammenstellung der Normen und Richtlinien	575
10.11	Literatur	578
11	Technologische Prüfverfahren	581
11.1	Wärmeformbeständigkeit	581
11.1.1	Grundlagen und Definitionen	581
11.1.2	Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur <i>HDT</i> und der <i>Vicat</i> -Erweichungstemperatur	582
11.1.3	Anwendungsbeispiele zur Aussagefähigkeit der <i>Vicat</i> - und <i>HDT</i> -Prüfung	585
11.2	Brandverhalten	590
11.2.1	Einleitung	590
11.2.2	Stufen eines Brandes und Brandparameter	592
11.2.3	Brandprüfungen	594
11.2.3.1	Neigung zu Schwelbrand	595
11.2.3.2	Entzündbarkeit	596
11.2.3.3	Flammenausbreitung	601
11.2.3.4	Wärmefreisetzung	603
11.2.3.5	Feuerwiderstand	605
11.2.3.6	Löschbarkeit	606
11.2.3.7	Rauchentwicklung	606

11.2.4 Die Anwendung des Cone-Kalorimeters zur Charakterisierung des Brandverhaltens	608
11.3 Bauteilprüfung	613
11.3.1 Einführung	613
11.3.2 Basisprüfmethoden	614
11.3.2.1 Allgemeines	614
11.3.2.2 Prüfung äußerer Merkmale	616
11.3.2.3 Prüfung von Werkstoffeigenschaften	617
11.3.2.4 Prüfung der Gebrauchstauglichkeit	619
11.3.3 Prüfung von Kunststoffrohren	620
11.3.3.1 Qualitätssicherung bei Kunststoffrohren	620
11.3.3.2 Prüfung des Zeitstandinnendrucks von Kunststoffrohren	622
11.3.4 Prüfung von Kunststoffbauteilen für Anwendungen im Automobilbau	625
11.3.4.1 Anforderungen an die Prüfung	625
11.3.4.2 Mechanische Prüfungen	625
11.3.4.3 Permeations- und Emissionsprüfungen	627
11.3.5 Prüfung von Kunststoffbauteilen für Anwendungen im Bauwesen	630
11.3.5.1 Einleitung	630
11.3.5.2 Prüfung von Sandwichelementen	631
11.3.5.3 Prüfung von Kunststoffmantelrohren	634
11.4 Implantatprüfung	638
11.4.1 Einführung	638
11.4.2 Push-out Test an Implantaten	640
11.4.3 Prüfung des Einsatzverhaltens von pharyngo-trachealen Stimmprothesen	644
11.4.4 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von humanem Knorpel	646
11.5 Zusammenstellung der Normen	649
11.6 Literatur	653
12 Folienprüfung	657
12.1 Grundlagen	657
12.2 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Folien	658
12.2.1 Zugversuch	658
12.2.2 Weiterreißversuch	661

12.2.3	Schlag- und Stoßverhalten	663
12.2.3.1	Schlagzugversuch	663
12.2.3.2	Dynamische Weiterreißprüfung	666
12.2.3.3	Stoßversuche	668
12.3	Charakterisierung des Trennverhaltens	673
12.3.1	Peeltests	673
12.3.2	Clingtest	683
12.4	Bruchmechanische Werkstoffbewertung	685
12.5	Charakterisierung von Folienoberflächen	690
12.6	Zusammenstellung der Normen	694
12.7	Literatur	695
13	Mikroprüftechnik	697
13.1	Einführung	697
13.2	Kennwertermittlung an Mikroprüfkörpern	701
13.2.1	Mikrozugprüfung	701
13.2.2	Bruchmechanische Untersuchungen mithilfe von miniaturisierten Compact Tension (CT)-Prüfkörpern	705
13.3	Nano-Eindringprüfung	707
13.4	Prüfmethoden auf dem Weg in die Nanowelt	710
13.4.1	Berührungslose Verschiebungsfeldbestimmung durch digitale Bildkorrelation (Grauwertkorrelationsanalyse)	710
13.4.2	In-situ-Deformationsmessungen im Atomkraftmikroskop (AFM) ..	712
13.5	Literatur	717
Index		719