

Wolfgang Grellmann
Sabine Seidler (Hrsg.)

Kunststoff- prüfung

2. Auflage

Unter Mitarbeit von

Volker Altstädt, Monika Bäuer, Christian Bierögel, Gert Busse, Klaus Friedrich,
Henrik Höninger, Thomas Lüpke, Bernd Michel, Hans-Joachim Radusch,
Falko Ramsteiner, Andreas Schönhals, Jörg Trempler

HANSER

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen (Auswahl)	XXI
Abkürzungsverzeichnis	XXIX
Kurzzeichen für Kunststoffe	XXXIII
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	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	29
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	39
3 Bestimmung verarbeitungsrelevanter Eigenschaften	41
3.1 Formmassen	41
3.2 Bestimmung von Schüttguteigenschaften	42

3.2.1	Schüttdichte, Stopfdichte, Füllfaktor	42
3.2.2	Rieselfähigkeit, Schüttwinkel, Rutschwinkel	44
3.3	Bestimmung von Fluideigenschaften	45
3.3.1	Rheologische Grundlagen	45
3.3.1.1	Viskosität NEWTON'scher und nicht-NEWTON'scher Fluide	45
3.3.1.2	Temperatur- und Druckabhängigkeit der Viskosität	49
3.3.1.3	Molmasseneinfluss 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	58
3.3.2.4	Dehnrheometer	69
3.3.3	Auswahl von Messmethoden zur rheologischen Charakterisierung von Polymerwerkstoffen	72
3.4	Zusammenstellung der Normen	73
3.5	Literatur	74
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	83
4.1.2.3	Viskoelastisches Verhalten	85
4.1.2.4	Plastisches Verhalten	91
4.2	Mechanische Spektroskopie	93
4.2.1	Experimentelle Bestimmung zeitabhängiger mechanischer Eigenschaften	94
4.2.1.1	Statische Prüfverfahren	94
4.2.1.2	Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA)	95
4.2.2	Zeit- und Temperaturabhängigkeit der viskoelastischen Eigenschaften	103
4.2.3	Strukturelle Einflussgrößen auf die viskoelastischen Eigenschaften	107
4.3	Quasistatische Prüfverfahren	108
4.3.1	Deformationsverhalten von Kunststoffen	108

4.3.2	Zugversuch an Kunststoffen	115
4.3.2.1	Theoretische Grundlagen des Zugversuches	115
4.3.2.2	Der konventionelle Zugversuch	119
4.3.2.3	Erweiterte Aussagemöglichkeiten des Zugversuches	128
4.3.3	Weiterreiversuch	134
4.3.4	Druckversuch an Kunststoffen	136
4.3.4.1	Theoretische Grundlagen des Druckversuches	136
4.3.4.2	Durchführung und Auswertung des Druckversuches	140
4.3.5	Biegeversuch an Kunststoffen	145
4.3.5.1	Theoretische Grundlagen des Biegeversuches	145
4.3.5.2	Der genormte Biegeversuch	151
4.4	Schlagartige Beanspruchung	156
4.4.1	Einführung	156
4.4.2	Schlagbiegeversuch und Kerbschlagbiegeversuch	157
4.4.3	Schlagzugversuch und Kerbschlagzugversuch	163
4.4.4	Fallbolzenversuch und Durchstoßversuch	166
4.5	Ermüdungsverhalten	169
4.5.1	Allgemeine Grundlagen	169
4.5.2	Experimentelle Ermittlung des Ermüdungsverhaltens	171
4.5.3	Planung und Auswertung von Ermüdungsversuchen	176
4.5.4	Einflussgrößen auf das Ermüdungsverhalten und die Lebensdauervorhersage von Kunststoffen	178
4.6	Statisches Langzeitverhalten	180
4.6.1	Allgemeine Grundlagen	180
4.6.2	Zeitstandzugversuch	182
4.6.3	Zeitstandbiegeversuch	190
4.6.4	Zeitstanddruckversuch	191
4.7	Härteprüfverfahren	192
4.7.1	Grundlagen der Härteprüfung	192
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	197
4.7.2.3	Sonderverfahren	201
4.7.2.4	Vergleichbarkeit von Härtewerten	201
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	210
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	217
4.8.2.4	Verschleißmechanismen und Transferfilmbildung	218
4.8.3	Verschleißprüfung und Verschleißkenngrößen	219
4.8.3.1	Ausgewählte Modell-Verschleißprüfungen	221
4.8.3.2	Verschleißkenngrößen und deren Ermittlung	222
4.8.3.3	Verschleißkenngrößen und deren Darstellung	224
4.8.4	Ausgewählte experimentelle Ergebnisse	224
4.8.4.1	Einfluss des Gegenpartners	224
4.8.4.2	Einfluss von Füllstoffen	226
4.8.4.3	Einfluss der Belastungsparameter	228
4.8.4.4	Eigenschaftsvorhersage mittels neuronaler Netze	230
4.8.5	Abschließende Bewertung	231
4.9	Zusammenstellung der Normen	232
4.10	Literatur	237
5	Zähigkeitsbewertung mit bruchmechanischen Methoden	243
5.1	Einführung	243
5.2	Stand und Entwicklungstendenzen	244
5.3	Grundaussagen bruchmechanischer Konzepte	246
5.3.1	Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM)	246
5.3.2	Crack Tip Opening Displacement- (CTOD-) Konzept	250
5.3.3	J-Integral-Konzept	254
5.3.4	Risswiderstands- (R-) Kurven-Konzept	255
5.4	Experimentelle Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte	257
5.4.1	Quasistatische Beanspruchung	257
5.4.2	Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch	261
5.4.2.1	Prüfanordnung	261
5.4.2.2	Einhaltung experimenteller Bedingungen	263
5.4.2.3	Typen von Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagrammen – Optimierung der Diagrammform	265
5.4.2.4	Spezielle Näherungsverfahren zur Bestimmung von J-Werten	267

5.4.2.5	Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie	270
5.4.3	Instrumentierter Fallversuch	272
5.5	Anwendungen in der Werkstoffentwicklung	274
5.5.1	Bruchmechanische Zähigkeitsbewertung von modifizierten Kunststoffen	274
5.5.1.1	Teilchengefüllte Kunststoffe	274
5.5.1.2	Faserverstärkte Kunststoffe	278
5.5.1.3	Blends und Copolymere	283
5.5.2	Anwendung des instrumentierten Schlagzugversuches zur Erzeugnisbewertung	289
5.5.3	Berücksichtigung des Bruchverhaltens bei der Werkstoffauswahl und Dimensionierung	293
5.6	Zusammenstellung der Normen	295
5.7	Literatur	296
6	Prüfung physikalischer Eigenschaften	299
6.1	Thermische Eigenschaften	299
6.1.1	Einleitung	299
6.1.2	Wärmeleitfähigkeitsbestimmung	301
6.1.3	Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)	305
6.1.4	Thermogravimetrische Analyse (TGA)	311
6.1.5	Thermomechanische Analyse (TMA)	313
6.2	Optische Eigenschaften	317
6.2.1	Einführung	317
6.2.2	Reflexion und Brechung	318
6.2.2.1	Gerichtete und diffuse Reflexion	318
6.2.2.2	Brechzahlbestimmung	319
6.2.3	Dispersion	323
6.2.4	Polarisation	324
6.2.4.1	Optische Aktivität	324
6.2.4.2	Polarisationsoptische Bauelemente	325
6.2.4.3	Polarisationsoptische Untersuchungsverfahren	327
6.2.5	Transmission, Absorption und Reflexion	334
6.2.6	Glanz, Innere Remission und Trübung	335
6.2.7	Farbe	339
6.2.8	Transparenz und Durchsichtigkeit	343
6.2.9	Infrarotspektroskopie	347
6.2.10	Lasertechnik	349
6.2.11	Prüfung auf die Konstanz optischer Werte	350

6.3	Elektrische und dielektrische Eigenschaften	352
6.3.1	Einleitung	352
6.3.2	Physikalische Grundlagen	355
6.3.3	Elektrische Leitfähigkeit und Widerstand	359
6.3.3.1	Durchgangswiderstand	359
6.3.3.2	Oberflächenwiderstand	362
6.3.3.3	Isolationswiderstand	363
6.3.3.4	Messverfahren	364
6.3.3.5	Kontaktierung und Prüfkörpervorbereitung	367
6.3.4	Dielektrische Eigenschaften und dielektrische Spektroskopie	368
6.3.4.1	Relaxationsprozesse	369
6.3.4.2	Wechselstromleitfähigkeit	377
6.3.4.3	Breitbandige dielektrische Messtechnik	379
6.3.5	Spezielle technische Prüfverfahren	386
6.3.5.1	Elektrostatische Aufladung	386
6.3.5.2	Elektrische Festigkeit	389
6.3.5.3	Kriechstromfestigkeit und Lichtbogenfestigkeit	393
6.4	Zusammenstellung der Normen	396
6.5	Literatur	399
7	Bewertung der Spannungsrissbeständigkeit	405
7.1	Allgemeine Bemerkungen zum Versagen von Kunststoffen in aggressiven Medien	405
7.2	Prüfung der Spannungsrissbeständigkeit	409
7.2.1	Prüfmethoden zur Bestimmung der umgebungsbedingten Spannungsrissbildung	409
7.2.2	Beispiele zur Bewertung der Spannungsrissbeständigkeit mit standardisierten Prüfverfahren	413
7.2.3	Bruchmechanische Prüfmethoden	418
7.3 ^a	Modellbetrachtungen zum Versagen von Polymeren in Medien durch Spannungsrisse	422
7.4	Einflussgrößen auf das Spannungsrissverhalten	426
7.4.1	Vernetzung	426
7.4.2	Molmasse und Molmassenverteilung	427
7.4.3	Verzweigungen	428
7.4.4	Kristalline Bereiche	429
7.4.5	Molekülorientierung	431
7.4.6	Physikalisch-chemische Wechselwirkungsvorgänge	434
7.4.7	Viskosität des Umgebungsmediums	440
7.4.8	Einfluss der Prüfkörperdicke	446

7.4.9	Einfluss der Temperatur	447
7.5	Zusammenstellung der Normen und Richtlinien	451
7.6	Literatur	452
8	Zerstörungsfreie Kunststoffprüfung	455
8.1	Einleitung	455
8.2	Zerstörungsfreie Prüfung mit elektromagnetischen Wellen	457
8.2.1	Röntgenstrahlung	457
8.2.1.1	Projektionsverfahren mittels Absorption	458
8.2.1.2	Compton-Rückstreuung	460
8.2.1.3	Röntgen-Refraktometrie	461
8.2.2	Spektralbereich des sichtbaren Lichts	464
8.2.2.1	Dickenmessung an transparenten Bauteilen	464
8.2.2.2	Spannungsoptik an transparenten Bauteilen	464
8.2.2.3	Konfokale Laserscanmikroskopie	465
8.2.2.4	Streifenprojektion zur Konturerfassung	467
8.2.2.5	Interferometrische Verfahren	468
8.2.3	Thermographie	473
8.2.4	Mikrowellen	474
8.2.5	Dielektrische Spektroskopie	478
8.2.6	Wirbelstrom	479
8.3	Zerstörungsfreie Prüfung mit elastischen Wellen	481
8.3.1	Elastische Wellen bei linearem Werkstoffverhalten	482
8.3.1.1	Ultraschall	482
8.3.1.2	Mechanische Vibrometrie	492
8.3.2	Elastische Wellen bei nichtlinearem Werkstoffverhalten	497
8.3.2.1	Grundlegendes zu elastischen Wellen im nichtlinearen Werkstoff	497
8.3.2.2	Nichtlinearer Luftultraschall	497
8.3.2.3	Nichtlineare Vibrometrie	500
8.4	Zerstörungsfreie Prüfung mit dynamischem Wärmetransport	503
8.4.1	Externe Anregung	503
8.4.1.1	Wärme­fluss­thermographie mit nichtperiodischem Wärmetransport	503
8.4.1.2	Thermographie mit periodischem Wärmetransport	505
8.4.2	Interne Anregung	509
8.4.2.1	Thermographie mit Anregung durch elastische Wellen	509
8.4.2.2	Thermographie mit anderen internen Anregungsarten	514

8.5	Ausblick	514
8.6	Literatur	516
9	Hybride Verfahren der Kunststoffdiagnostik	521
9.1	Zielstellung	521
9.2	Zugversuch, Schallemissionsprüfung und Videothermographie	523
9.3	Zugversuch und Laserextensometrie	526
9.4	Bruchmechanik und Zerstörungsfreie Prüfung	531
9.5	Literatur	535
10	Prüfung von Verbundwerkstoffen	537
10.1	Einführung	537
10.2	Theoretischer Hintergrund	539
10.2.1	Anisotropie	539
10.2.2	Elastische Eigenschaften von Laminaten	540
10.2.3	Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur	540
10.2.4	Laminattheorie und Hauptsatz nach St. VENANT	541
10.2.5	Anwendung bruchmechanischer Konzepte für FVW	542
10.3.	Prüfkörperherstellung	545
10.3.1	Laminatherstellung	545
10.3.2	Prüfkörpervorbereitung für unidirektionale Beanspruchung	547
10.4	Bestimmung des Faservolumengehaltes	548
10.5	Mechanische Prüfmethode(n)	550
10.5.1	Zugversuche	550
10.5.2	Druckversuche	553
10.5.3	Biegeversuche	557
10.5.4	Interlaminare Scherfestigkeit	560
10.5.5	Schubversuche	561
10.5.5.1	$\pm 45^\circ$ Off-Axis Zugversuch	562
10.5.5.2	10° Off-Axis Zugversuch	563
10.5.5.3	Two- und Three-Rail Scherversuche	564
10.5.5.4	Iosipescu Schubversuch	566
10.5.5.5	Plate-Twist Schubversuch	567
10.5.5.6	Torsion dünnwandiger Rohre	568
10.6	Bruchmechanische Prüfmethode(n)	569
10.6.1	Experimentelle Prüfung von FVW	569
10.6.2	Spezielle Prüfkörperformen	570
10.6.2.1	Prüfkörper für Mode I-Beanspruchung	570
10.6.2.2	Prüfkörper für Mode II-Beanspruchung	572
10.6.2.3	Mixed Mode-Prüfkörper	575

10.6.3	Bruchmechanische Kennwerte von FVW	577
10.7	Spezifische Prüfmethode	579
10.7.1	Edge-Delamination Test (EDT)	579
10.7.2	Boeing Open-Hole Compression Prüfung	580
10.8	Schälfestigkeit biegeweicher Lamine	581
10.9	Schlagbeanspruchung und Schadenstoleranz	582
10.10	Zusammenstellung der Normen und Richtlinien	586
10.11	Literatur	589
11	Technologische Prüfverfahren	591
11.1	Wärmeformbeständigkeit	591
11.1.1	Grundlagen und Definitionen	591
11.1.2	Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT und der VICAT-Erweichungstemperatur	592
11.1.3	Anwendungsbeispiele zur Aussagefähigkeit der VICAT- und HDT-Prüfung	595
11.2	Brandverhalten	600
11.2.1	Einleitung	600
11.2.2	Stufen eines Brandes und Brandparameter	602
11.2.3	Brandprüfungen	605
11.2.3.1	Neigung zu Schwelbrand	606
11.2.3.2	Entzündbarkeit	606
11.2.3.3	Flammenausbreitung	611
11.2.3.4	Wärmefreisetzung	614
11.2.3.5	Feuerwiderstand	616
11.2.3.6	Löschbarkeit	616
11.2.3.7	Rauchentwicklung	616
11.2.4	Die Anwendung des Cone-Kalorimeters zur Charakterisierung des Brandverhaltens	618
11.3	Bauteilprüfung	624
11.3.1	Einführung	624
11.3.2	Basisprüfmethode	625
11.3.2.1	Allgemeines	625
11.3.2.2	Prüfung äußerer Merkmale	625
11.3.2.3	Prüfung von Werkstoffeigenschaften	627
11.3.2.4	Prüfung der Gebrauchstauglichkeit	630
11.3.3	Prüfung von Kunststoffrohren	631
11.3.3.1	Qualitätssicherung bei Kunststoffrohren	631
11.3.3.2	Prüfung des Zeitstandinnendruckes von Kunststoffrohren	633

11.3.4	Prüfung von Kunststoffbauteilen für Anwendungen im Automobilbau	636
11.3.4.1	Anforderungen an die Prüfung	636
11.3.4.2	Mechanische Prüfungen	636
11.3.4.3	Permeations- und Emissionsprüfungen	638
11.3.5	Prüfung von Kunststoffbauteilen für Anwendungen im Bauwesen	642
11.3.5.1	Einleitung	642
11.3.5.2	Prüfung von Sandwichelementen	642
11.3.5.3	Prüfung von Kunststoffmantelrohren	646
11.4	Implantatprüfung	650
11.4.1	Einführung	650
11.4.2	Push-Out Test an Implantaten	652
11.4.3	Prüfung des Einsatzverhaltens von pharyngo-trachealen Stimmprothesen	656
11.4.4	Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von humanem Knorpel	659
11.5	Zusammenstellung der Normen	661
11.6	Literatur	664
12	Mikroprüftechnik	667
12.1	Einführung	667
12.2	Kennwertermittlung an Mikroprüfkörpern	671
12.2.1	Mikrozugprüfung	671
12.2.2	Bruchmechanische Untersuchungen mit Hilfe von miniaturisierten Compact Tension (CT)-Prüfkörpern	675
12.3	Nano-Eindringprüfung	678
12.4	Prüfmethoden auf dem Weg in die Nanowelt	680
12.4.1	Berührungslose Verschiebungsfeldbestimmung durch digitale Bildkorrelation (Grauwertkorrelationsanalyse)	680
12.4.2	In-situ-Deformationsmessungen im Atomkraftmikroskop (AFM) ..	682
12.5	Literatur	687
	Sachwortverzeichnis	689