

# Inhaltsverzeichnis

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

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

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

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

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

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

8.4.1.1	Wärmeflussthermographie mit nichtperiodischem Wärmetransport .....	509
8.4.1.2	Thermographie mit periodischem Wärmetransport .....	511
8.4.2	Interne Anregung .....	515
8.4.2.1	Thermographie mit Anregung durch elastische Wellen .....	515
8.4.2.2	Thermographie mit anderen internen Anregungsarten .....	520
8.5	Ausblick .....	520
8.6	Literatur .....	522
<b>9</b>	<b>Hybride Verfahren der Kunststoffdiagnostik .....</b>	<b>529</b>
9.1	Zielstellung .....	529
9.2	Zugversuch, Schallemissionsprüfung und Videothermographie .....	531
9.3	Zugversuch und Laserextensometrie .....	534
9.4	Bruchmechanik und Zerstörungsfreie Prüfung .....	539
9.5	Literatur .....	543
<b>10</b>	<b>Prüfung von Verbundwerkstoffen .....</b>	<b>547</b>
10.1	Einführung .....	547
10.2	Theoretischer Hintergrund .....	549
10.2.1	Anisotropie .....	549
10.2.2	Elastische Eigenschaften von Laminaten .....	550
10.2.3	Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur .....	551
10.2.4	Laminattheorie und Hauptsatz nach <i>St. Venant</i> .....	551
10.2.5	Anwendung Bruchmechanischer Konzepte für FVW .....	552
10.3	Prüfkörperherstellung .....	555
10.3.1	Laminatherstellung .....	555
10.3.2	Prüfkörpervorbereitung für unidirektionale Beanspruchung .....	557
10.4	Bestimmung des Faservolumengehalts .....	558
10.5	Mechanische 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	$10^\circ$ Off-Axis Zugversuch .....	573
10.5.5.3	Two- und Three-Rail Scherversuche .....	574
10.5.5.4	<i>Iosipescu</i> Schubversuch .....	575
10.5.5.5	Plate-Twist Schubversuch .....	576
10.5.5.6	Torsion dünnwandiger Rohre .....	577
10.6	Bruchmechanische 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 biegeeweicher Lamine .....	590
10.9	Schlagbeanspruchung und Schadenstoleranz .....	592
10.10	Zusammenstellung der Normen und Richtlinien .....	596
10.11	Literatur .....	599
<b>11</b>	<b>Technologische Prüfverfahren .....</b>	<b>601</b>
11.1	Wärmeformbeständigkeit .....	601
11.1.1	Grundlagen und Definitionen .....	601
11.1.2	Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur <i>HDT</i> und der <i>Vicat</i> -Erweichungstemperatur .....	602
11.1.3	Anwendungsbeispiele zur Aussagefähigkeit der <i>Vicat</i> - und <i>HDT</i> -Prüfung .....	605
11.2	Brandverhalten .....	609
11.2.1	Einleitung .....	609
11.2.2	Stufen eines Brandes und Brandparameter .....	612
11.2.3	Brandprüfungen .....	614
11.2.3.1	Neigung zu Schwelbrand .....	615
11.2.3.2	Entzündbarkeit .....	616
11.2.3.3	Flammenausbreitung .....	621
11.2.3.4	Wärmefreisetzung .....	624
11.2.3.5	Feuerwiderstand .....	626
11.2.3.6	Löschbarkeit .....	627
11.2.3.7	Rauchentwicklung .....	627
11.2.4	Die Anwendung des Cone-Kalorimeters zur Charakterisierung des Brandverhaltens .....	629
11.3	Bauteilprüfung .....	634
11.3.1	Einführung .....	634
11.3.2	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 Zeitstandinnendruckes von Kunststoffrohren .....	643
11.3.4	Prüfung von Kunststoffbauteilen für Anwendungen im Automobilbau ...	646
11.3.4.1	Anforderungen an die Prüfung .....	646
11.3.4.2	Mechanische Prüfungen .....	646
11.3.4.3	Permeations- und Emissionsprüfungen .....	648
11.3.5	Prüfung von Kunststoffbauteilen für Anwendungen im Bauwesen .....	651
11.3.5.1	Einleitung .....	651



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