

# Inhalt

<b>Vorwort zur 4. Auflage</b> .....	<b>V</b>
<b>Vorwort zur 1. Auflage</b> .....	<b>VII</b>
<b>Die Herausgeber</b> .....	<b>IX</b>
Wolfgang Grellmann .....	IX
Sabine Seidler .....	X
Mitautoren .....	X
<b>Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen (Auswahl)</b> .....	<b>XXV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XXXVII</b>
<b>Kurzzeichen für Kunststoffe</b> .....	<b>XLI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2 Prüfkörperherstellung</b> .....	<b>15</b>
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
<b>3</b>	<b>Bestimmung verarbeitungsrelevanter Eigenschaften .....</b>	<b>41</b>
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

<b>4</b>	<b>Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen</b>	<b>75</b>
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
<b>5</b>	<b>Zähigkeitsbewertung mit bruchmechanischen Methoden ...</b>	<b>237</b>
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
<b>6</b>	<b>Prüfung physikalischer Eigenschaften .....</b>	<b>293</b>
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
<b>7</b>	<b>Bewertung der Spannungsrisssbeständigkeit .....</b>	<b>395</b>
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
<b>8</b>	<b>Zerstörungsfreie Kunststoffprüfung .....</b>	<b>445</b>
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	Wärmefluss thermographie 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
<b>9</b>	<b>Hybride Verfahren der Kunststoffdiagnostik .....</b>	<b>511</b>
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
<b>10</b>	<b>Prüfung von Verbundwerkstoffen .....</b>	<b>527</b>
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 Prüfmethode(n) .....	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	$10^\circ$ 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
<b>11</b>	<b>Technologische Prüfverfahren .....</b>	<b>581</b>
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 Zeitstandinnendruckes 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
<b>12</b>	<b>Folienprüfung .....</b>	<b>657</b>
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 Weiterreiprfung .....	666
12.2.3.3 Stoversuche .....	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 Folienoberflchen .....	690
12.6 Zusammenstellung der Normen .....	694
12.7 Literatur .....	695
<b>13 Mikroprftechnik .....</b>	<b>697</b>
13.1 Einfhrung .....	697
13.2 Kennwertermittlung an Mikroprfkrpern .....	701
13.2.1 Mikrozugprfung .....	701
13.2.2 Bruchmechanische Untersuchungen mithilfe von miniaturisierten Compact Tension (CT)-Prfkrpern .....	705
13.3 Nano-Eindringprfung .....	707
13.4 Prfmethoden auf dem Weg in die Nanowelt .....	710
13.4.1 Berhrungslose Verschiebungsfeldbestimmung durch digitale Bildkorrelation (Grauwertkorrelationsanalyse) .....	710
13.4.2 In-situ-Deformationsmessungen im Atomkraftmikroskop (AFM) ..	712
13.5 Literatur .....	717
<b>Index .....</b>	<b>719</b>