

HANSER



Leseprobe

zu

„Strukturverhalten“

von Gottfried W. Ehrenstein

Print-ISBN: 978-3-446-46703-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-46710-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46703-3>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Der Herausgeber

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c. Gottfried Wilhelm Ehrenstein wurde 1937 in Danzig geboren und hat nach einem humanistischen Abitur an der Technischen Hochschule Hannover Allgemeinen Maschinenbau studiert. Nach der Promotion (Prof. Matting) arbeitete er 10 Jahre in der Anwendungstechnischen Abteilung Kunststoffe der BASF AG und war gleichzeitig Lehrbeauftragter und nach der Habilitation 1976 Privatdozent der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH, Prof. Macherauch). Von 1977 bis 1989 war er Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffkunde/Kunststoffe der Universität-Gesamthochschule Kassel. Nach Rufen an die TU Harburg, die Montanuniversität Leoben und die TU Berlin war er ab 1989 Professor für Kunststofftechnik des von ihm neu eingerichteten Lehrstuhls der Universität Erlangen-Nürnberg.



(Quelle: LKT Erlangen)

Von 1987 bis 1992 war er nebenamtlich Leiter des Süddeutschen Kunststoffzentrums in Würzburg. 1992 wurde er Honorarprofessor des Chemischen Instituts der Universität Qingdao, China, und 1996 Ehrendoktor der Technischen Universität Budapest. Prof. Ehrenstein ist vereidigter Sachverständiger der IHK Nürnberg für Kunststoffe und Sonderwerkstoffe auf Kunststoffbasis und des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin.

Er ist Gründer des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik (WAK), der Dissertationsdatenbank und der Zeitschrift Kunststofftechnik im Rahmen von www.kunststoffe.de mit Unterstützung des Carl Hanser Verlages.

Prof. Ehrenstein war verheiratet und ist Vater von drei Söhnen.

Danksagung

Dieses Buch „Strukturverhalten“ war nur dank vielfältiger Unterstützung möglich. Der Dank gebührt an erster Stelle der Leiterin der Analytik des Lehrstuhls für Kunststofftechnik Frau Dipl.-Ing. (FH) Gabriela Riedel und ihrer Vertreterin Frau Pia Trawiel, ebenso dem Leiter des Labors Mechanische Prüfung Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Karsten. Frau Riedel und Frau Trawiel arbeiten seit 30 Jahren auf dem Gebiet der Strukturanalyse in der weltweit größten anwendungstechnisch und wissenschaftlich geprägten universitären Laborgruppe der Kunststofftechnik in Erlangen. Ihre systematische Analyse war ein fundamentaler Beitrag zum Gelingen dieses Buchs.

Ebenso möchte ich die Autorin Nicole Zaspel (als Nicole Braun mehrfach veröffentlicht) lobend erwähnen. Sie hat jahrelang aktiv und konstruktiv bei der Umsetzung der Manuskripte geholfen.

Begleitwort von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt

Die Kunststofftechnik umfasst ein breites Spektrum an Fachgebieten. Diese reichen von der Entwicklung und Synthese von Polymeren auf molekularer Ebene, über deren Verarbeitung und die Materialprüfung bis hin zur Anwendung. Um die Wechselwirkung zwischen der molekularen Struktur und den makroskopischen Eigenschaften von Polymeren bei der Schadensanalyse zu verstehen, braucht es viel Expertise und Erfahrung mit verschiedensten Messmethoden und deren folgerichtigen Interpretation. Das Verbinden der Teilbereiche ist bei der Schadensanalyse unumgänglich, da Polymere durch Modifikationen und Optimierung heute auf Höchstleistung getrimmt werden und dann auch leicht an eine Grenze kommen, wo eine Schädigung auftritt.



In diesen 5 Kapiteln im Band „Strukturverhalten“ des Gesamtwerks steht die Verbindung „Wieso Weshalb Warum“ im Vordergrund und die Frage, welche Mess- oder Prüfmethode verwendet werden muss, um die Ursache einer Schädigung zu verstehen. Inhaltlich ist dieser Band stark physikalisch geprägt und von hoher Anwendungsrelevanz.

Die Oberflächenspannung ist bei Kunststoffen besonders beim Lackieren oder Bedrucken, beim Beschichten oder beim Verkleben von großer Bedeutung. Kunststoffschäden können durch mangelhafte Benetzbarkeit bzw. Nichtbenetzbarkeit, z. B. bei einer bedruckten Verpackungsfolie auftreten. In diesem Kapitel werden zunächst die Grundbegriffe erläutert und der physikalische Hintergrund auf molekularer Ebene erklärt. In der Praxis gibt es eine Vielzahl an Methoden, die Oberflächenspannung zu bestimmen. Diese werden alle erklärt und ihre Stärken und Schwächen kritisch aufgezeigt. Für den Praktiker sehr wertvoll ist ein abschließender Vergleich der Oberflächenspannungs-Messverfahren, der sinnvoll nach Methoden für Thermoplaste und Duromere unterscheidet. Die abschließenden praktischen Anwendungen helfen dem Leser, den zuvor gelernten Stoff praxisnah zu verwenden.

Die umgebungsabhängige Bildung von Spannungsrissen, im englischen auch „Environmental Stress Cracking“ (ESC) genannt, ist einer der Hauptgründe für mechanisches Versagen und einer damit einhergehenden Verkürzung der Lebensdauer von Kunststoffbauteilen. Die daraus resultierenden Schadensfälle sind physikalisch bedingt und treten immer dann auf, wenn das Polymer zeitgleich sowohl einer mechanischen Last als auch einem aggressiven Medium ausgesetzt ist. In diesem Kapitel wird anschaulich gezeigt, dass abhängig von der Art des Polymers bereits eine simple Flüssigkeit wie Wasser als aggressives Medium bezeichnet werden und die Rissbildung auslösen kann. Dies führt zu dem Umstand, dass knapp 25 % aller Schäden auf ESC zurückzuführen sind. Von diesen 25 % entfallen fast 90 % auf die Klasse der amorphen Polymere, da diese aufgrund ihrer molekularen Struktur anfälliger sind als beispielsweise teilkristalline Polymere. Ein ESC-Versagen kann z. B. bei medizinischen Produkten im schlimmsten Fall zu lebensbedrohlichen Situationen führen. Da es sich bei ESC „lediglich“ um einen rein physikalischen Vorgang handelt, sind die Möglichkeiten zur schnellen und wissenschaftlich belastbaren Untersuchung dieses werkstoffspezifischen Phänomens bis heute sehr begrenzt. Das Kapitel gibt eine sehr anschauliche und wissenschaftlich in die Tiefe gehende Einführung in das Phänomen (ESC) und zeigt auch werkstoffliche Einflüsse auf. Neben den wichtigsten Prüfmethoden wird die Gesamtproblematik an praxisnahen Schadensfällen anschaulich dargelegt.

Die magische Dreiecksbeziehung zwischen Struktur, Verarbeitung und Eigenschaften eines Werkstoffs kann ohne die Berücksichtigung des Einflusses der Verarbeitung und konstruktiver Faktoren nie abschließend geklärt werden. Für den Schadensanalytiker ist dieses Kapitel ein Leckerbissen, da hier die Schwächen der genormten Prüfverfahren ganz praxisnah diskutiert werden. Zunächst werden am Beispiel von DMA-Messungen die drei Zustandsbereiche der Kunststoffe eindeutig geklärt und dabei der Begriff der „Glastemperatur“ und deren zweifelhafte Bestimmungsmethoden aus Sicht des Physikers und des Ingenieurs am Beispiel von amorphen Thermoplasten kritisch gegenübergestellt. Dabei werden auch Messmethoden wie modulierte DSC und pvT-Gerät zum Vergleich mit herangezogen. Vor der Diskussion des Schmelzverhaltens teilkristalliner Kunststoffe werden zunächst wichtige Begrifflichkeiten wie z. B. Keimbildung und morphologische Überstrukturen präzise definiert. Im Anschluss an die Darstellung der teilweise sehr komplexen morphologischen Struktur der Thermoplaste werden die Besonderheiten der mechanischen Prüfung von Kunststoffen diskutiert. Die übergeordnete Zielsetzung ist es, Kennwerte zu ermitteln, die eine Funktionstauglichkeit des Formteils über den vorgesehenen Einsatzzeitraum gewährleisten. Dazu müssen Daten für die Werkstoffbeurteilung vom Granulat Korn bis zur Formteilprüfung und Praxiserprobung bestimmt werden.

Zusammenfassend vermitteln die fünf Kapitel dieses Bandes dem Schadensanalytiker sehr wichtige Grundlagen und geben gleichzeitig wertvolle Anwendungstipps anhand praktischer Beispiele. Außerdem wird vor möglichen Fehlinterpretationen der Messergebnisse gewarnt. Professor Ehrenstein hat bereits im Jahr 2017 im „Jahresmagazin Kunststoffe“ auf Unklarheiten in der Kunststofftechnik deutlich hingewiesen. Er stellt fest, dass die Eigenschaften der Kunststoffe im Bauteil fast nie ausreichend mit den in einem genormten Prüfverfahren ermittelten und den von den Rohstoffherstellern veröffentlichten Werten übereinstimmen, denn auch diese unterliegen den Einflüssen der speziellen Verarbeitungsverfahren in unterschiedlichen Werkzeugen zur Herstellung der Musterproben und sind nie unter den gleichen Bedingungen hergestellt wie später die Bauteile.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt

Volker Altstädt arbeitete nach seinem Studium der Physik und seiner Promotion bei Prof. Gottfried W. Ehrenstein am Institut für Werkstofftechnik in Kassel (1987) acht Jahre bei der BASF AG in Ludwigshafen in der Polymerforschung, zuletzt als Gruppenleiter in der Abteilung Polymerphysik. Ab 1995 war er Lehrstuhlinhaber an der TU Hamburg-Harburg. Zusätzlich übernahm er ab 1998 die Leitung des Arbeitsbereiches Kunststoffe & Verbundwerkstoffe. Im Jahr 2000 wechselte Volker Altstädt an die Universität Bayreuth und übernahm dort die Leitung des Lehrstuhls für Polymere Werkstoffe an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften. Parallel zu dieser Funktion ist Volker Altstädt seit 2009 alleiniger Geschäftsführer der Neue Materialien Bayreuth GmbH, einer außeruniversitären Landesforschungseinrichtung des Freistaats Bayern, die sich mit anwendungsnahe Werkstoff- und Verfahrensentwicklung für Kunststoffe, Verbundwerkstoffe und Metalle beschäftigt.

Die Forschungsarbeiten von Volker Altstädt beziehen sich auf die wissenschaftliche und anwendungs-orientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der polymeren Werkstoffe mit dem Ziel, die naturwissenschaftlichen Erkenntnisse mit den Aspekten der Ingenieurwissenschaften zu verbinden. Realisiert wird dies durch eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Chemikern und Ingenieuren.

Inhalt

Der Herausgeber	VII
Begleitwort von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt	IX
1 Struktur der Kunststoffe	1
1.1 Grundlagen	1
1.2 Besonderheiten der Kunststoffe	2
1.2.1 Zustandsbereiche	3
1.2.2 Strukturen (amorphe Thermoplaste)	11
1.2.2.1 Schmelztemperatur teilkristalliner Thermoplaste	14
1.2.2.2 Fließtemperatur amorpher Thermoplaste als G'/G'' ..	15
1.2.2.3 Thermische Kennwerte amorpher Thermoplaste	25
1.2.3 Kristalline Strukturen (Lamellen)	26
1.2.4 Übergeordnete kristalline Strukturen	37
1.2.5 Kristallisation teilkristalliner Thermoplaste	40
1.2.5.1 Keimbildung und Kristallisation	42
1.2.5.2 Schmelz- und Kristallisationstemperatur	45
1.2.5.3 Kristallisationsgeschwindigkeit	48
1.2.5.4 Nukleierungsmittel	51
1.3 Normen	57
1.4 Literatur	57
2 Eigenschaften der Kunststoffe	59
2.1 Zielsetzung	59
2.2 Eignung der mechanischen Prüfung	60
2.3 Festigkeit	61
2.3.1 Verformungskennwerte	66
2.3.2 Temperatur-Steifigkeits-Verhalten	70
2.3.3 Temperatur-Spannungs-Verhalten	80

2.4	Füll- und Verstärkungsstoffe	81
2.5	Konstruktionsgerechte und aussagefähige Kennwerte von Kunststoffen	86
2.5.1	Kennwerte nach Norm – Eigenschaften von Formteilen	88
2.5.2	Zug	89
2.5.2.1	Prüfungen	89
2.5.2.2	Prüfkörper	89
2.5.2.3	Festigkeit – Steifigkeit	90
2.5.3	Prüfkörperstruktur	92
2.5.4	Biegung	95
2.5.5	Einfluss Temperatur	97
2.5.6	Perspektiven	103
2.5.6.1	Festkörper	103
2.5.6.2	Rheologie	103
2.5.7	CAMPUS	104
	<i>Dr. Erwin Baur</i>	
2.5.8	Einheiten	109
2.6	Normen	112
2.7	Literatur	117
3	Oberflächenspannung	119
	<i>Mit Dr.-Ing. Agnieszka Kopczynska, eingefügte Änderungsvorschläge</i>	
	<i>Prof. W. Leiner</i>	
3.1	Begriff	119
3.2	Einleitung und Definition	120
3.2.1	Grundlagen	125
3.2.2	Gleichungen zur Berechnung	130
3.2.2.1	Benetzungsverhalten und Spreitung	131
3.2.2.2	Adhäsion	132
3.2.3	Bestimmung der Oberflächenspannung	134
3.2.4	Messverfahren von Flüssigkeiten und Schmelzen	138
3.2.4.1	Ringmethode	138
3.2.4.2	Wilhelmy-Plättchen-Methode	141
3.2.4.3	Methode des hängenden Tropfens	142
3.2.4.4	Lamellen-Methode	144
3.2.4.5	Einfluss auf die Struktur der Kunststoffe	145
3.2.4.6	Vergleich der Testverfahren und der Testflüssigkeiten	147
3.2.5	Messverfahren zur Oberflächenspannung von festen Kunststoffen	150
3.2.5.1	Probleme bei der Messung	152
3.2.5.2	Liegender-Tropfen Methode	153

3.2.5.2.1	Manuelle Messung des Randwinkels	154
3.2.5.2.2	Automatische Bestimmung des Kontaktwinkels	156
3.2.5.3	Steighöhenverfahren	157
3.2.5.3.1	Bestimmung des Kontaktwinkels von Festkörpern	157
3.2.5.3.2	Bestimmung des Kontaktwinkels von Pulvern	159
3.2.6	Ermittlung der Oberflächenspannung von Körpern	161
3.2.7	Oberflächenspannung fester Kunststoffe	163
3.2.7.1	Auswertung nach verschiedenen Zustandsgleichungen	163
3.2.7.1.1	Verfahren nach Neumann	163
3.2.7.1.2	Verfahren nach Owens und Wendt	164
3.2.7.1.3	Verfahren nach Wu	164
3.2.8	Vergleich der Oberflächenspannungs-Messverfahren	165
3.2.8.1	Prüfflüssigkeiten	165
3.2.8.2	Feste Kunststoffe (verschiedene Auswerteverfahren)	165
3.2.8.3	Kunststoffe im festen und flüssigen Zustand	166
3.2.8.3.1	Reaktionsharze im festen und flüssigen Zustand	167
3.2.8.3.2	Thermoplaste	168
3.2.8.4	Statischer und Vor- und Rückzugs-Winkel im festen Zustand	170
3.3	Normen	173
3.4	Verwendete Literatur	174
4	Praktische Anwendungen zur Oberflächenspannung	177
	<i>Mit Dr.-Ing. Agnieszka Kopczyńska</i>	
4.1	Polare und dispersive Anteile	177
4.2	Durchstrahlklebverbindungen mit/ohne Plasmabehandlung	177
4.3	Montageklebung PBT/TPU mit und ohne Plasmabehandlung	181
4.4	Bauelemente – Klebstoff – Substrat	184
4.5	Gerade vollständige Benetzung nach Zisman	185
4.6	Gleit-Reib-Verhalten	186
4.7	Lack und Kunststoff	189
4.8	Kommunizierende Luftblase	190
4.9	Mischung unterschiedlicher Schmelzen	192
4.10	Hochgefüllte Kunststoffe	197
4.11	Silikone	201

4.12	Normen	202
4.13	Verwendete Literatur	203
5	Spannungsrisse in Kunststoffen	205
5.1	Spannungsrisse oder Crazes	205
5.1.1	Verschiedene Craze-Formen und deren Bildung	205
5.1.2	Wirkung von Spannungsrisen	211
5.1.3	Werkstoffliche Einflüsse	217
5.1.4	Einfluss der Löslichkeit und Oberflächenspannung	222
5.1.5	Entstehung von Spannungsrisen	223
5.1.6	Spannungsrisssauslösende Medien	226
5.1.6.1	Polyamid	229
5.1.6.2	Polyethylen	230
5.1.6.3	Polystyrol	230
5.1.6.4	Lösemittel – Nichtlöser	231
5.2	Prüfmethoden	233
5.2.1	Zeitstandzugversuch	237
5.2.2	Biegestreifenverfahren	238
5.2.3	Stift- und Kugeleindruckverfahren	242
5.2.4	Dow-Säbel- und Bell-Test	252
5.2.5	Spannungsrisssprüfung bei Fertigteilen	255
5.2.6	Beurteilung der Prüfverfahren	257
5.3	Anwendungsbeispiele	259
5.3.1	Heizkörperhalter (Medieneinwirkung – Molekulargewicht – Kautschukkomponente)	259
5.3.2	Flugzeugfrontscheibe (Medieneinwirkung – Molekulargewicht)	260
5.3.3	Stellgetriebe (äußere Spannungen – Fetteinwirkung)	261
5.3.4	Campingpumpe (Molekulargewicht – Metallkorrosion)	262
5.3.5	Inserts	263
5.3.6	Ungeklärtes Phänomen	265
5.3.7	Untersuchte Thermoplaste	266
5.4	Abschluss	267
5.5	Normen	267
5.6	Verwendete Literatur	269
	Index	271

1

Struktur der Kunststoffe

Es gibt kaum eine Verwendung von Werkstoffen, bei der vom Werkstoff lediglich seine Eigenschaft der Raumauffüllung verlangt wird. Meist muss er Anforderungen mechanischer, physikalischer, elektrischer oder chemischer Art genügen. Dies bedeutet, dass man bei der Konzeption eines Teiles eine Werkstoffauswahl treffen muss, die sich nicht nur nach rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten richten kann, sondern auch die Kenntnis vom Eigenschaftsbild des Werkstoffs erfordert. Die Eigenschaftswerte der Kunststoffe werden zum größten Teil durch den Rohstoff-Lieferanten ermittelt und weitergegeben. Obwohl auf diesem Gebiet viel geleistet wurde und ein großes Wissen vorliegt, ist es für den Anwender der Kunststoffe oft schwierig, die für ihn wichtigen Daten unter den komplexen Bedingungen zu erhalten und dann entsprechend seinen Anforderungen zu bewerten.

■ 1.1 Grundlagen

Für die Durchführung von Schadensanalysen stehen eine Vielzahl von Verfahren und Methoden zur Verfügung, um die verschiedensten Schadenshypothesen zu untersuchen. Nicht immer reicht eine Methode aus, daher ist es sinnvoll, verschiedene Methoden zu kombinieren. Hier ist oftmals die Erfahrung des Schadensanalytikers gefragt. In Kapitel 1 „Systemische Schadensanalyse“ von Band 7 der Reihe „Erlanger Kunststoff-Schadensanalyse“ findet sich eine Methodenübersicht, die aufzeigt, welche Methoden für welche Fragestellungen sinnvoll genutzt werden können.

Eine Besonderheit liegt auch darin, dass die Eigenschaften der Kunststoffe stark von den Einflüssen bei der Verarbeitung und auch der konstruktiven Gestaltung abhängen. Eine Folge davon ist, dass die Eigenschaften der Kunststoffe im Bauteil fast nie ausreichend mit den in einem genormten Prüfverfahren ermittelten und denen von den Rohstoffherstellern veröffentlichten Werten übereinstimmen, denn auch diese unterliegen den Einflüssen der speziellen Verarbeitungsverfahren zur Herstellung der Musterproben.

1.2 Besonderheiten der Kunststoffe

Die Besonderheit der Kunststoffe im Hinblick auf die Analyse-Verfahren und -Methoden sind:

- Ihr Aufbau aus polymeren fadenförmigen Makromolekülen mit speziellen Kennzeichen, Bild 1.1. Die fadenförmige Struktur der Makromoleküle bewirkt häufig Anisotropien.
- Die praktisch realisierten Eigenschaften der Festigkeit und Steifigkeit der Kunststoffe, die sehr viel geringer sind, als die bei Glas und Metallen.

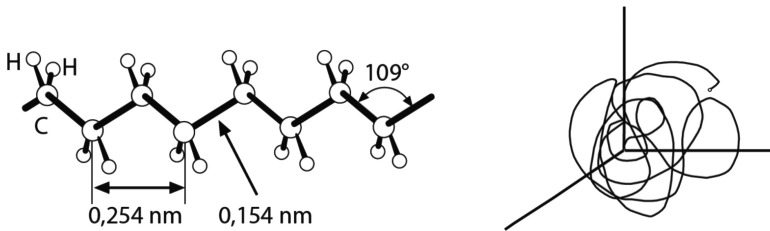


Bild 1.1 Makromoleküle in Kunststoffen

- durch Hauptvalenzen gebundene gleichartige Monomeren mit mindestens 1000 Atomen
- Hauptvalenzbindungen sind ca. 500 x fester als Nebenvalezenbindungen
- durch Hinzufügen oder Wegnehmen einzelner Gruppen ändern sich die Eigenschaften kaum
- Dicke: 0,1 bis 0,2 nm, Länge: 2 μm , optisch nicht sichtbar
- 60% der Polymere bestehen nur aus Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H)
- die thermodynamisch günstigste Form eines Makromoleküls ist das Knäuel oder eine kugelförmige Kristallstruktur (Oberflächenspannung)
- es gibt keine vollständig kristalline Struktur; teilkristalline Thermoplaste bestehen aus fest miteinander verbundenen amorphen und kristallinen Bereichen (Faltungen)

Tabelle 1.1 Theoretische und experimentelle Festigkeit und Steifigkeit von Werkstoffen

Werkstoff	E-Modul [N/mm^2]			Zugfestigkeit [N/mm^2]		
	theoretisch	experimentell		theoretisch	experimentell	
		Faser	kompakt		Faser	kompakt
Polyethylen	300 000	100 000 (33%)	1000 (0,33%)	27 000	1500 (5,5%)	30 (0,1%)
Polypropylen	50 000	20 000 (40%)	1600 (3,2%)	16 000	1300 (8,1%)	38 (0,24%)
Polyamid	160 000	5000 (3%)	2000 (1,3%)	27 000	1700 (6,3%)	50 (0,18%)
Glas	80 000	80 000 (100%)	70 000 (87,5%)	11 000	4000 (36%)	55 (0,5%)

1.2.5.2 Schmelz- und Kristallisationstemperatur

Die einfache Thermodynamik besagt, dass beim Überschreiten der Gleichgewichtsschmelztemperatur eine homogene Flüssigkeit von geschmolzenen Polymerketten vorliegt. In der Realität hängt allerdings einerseits der Schmelzpunkt von der Vorgeschichte (Verarbeitungshistorie) des Werkstoffes ab.

Andererseits benötigt das Material Zeit, um beim Schmelzen in den Gleichgewichtszustand zu gelangen. Die kristalline Ordnung benötigt Zeit um sich aufzulösen. Wenn man diesen Punkt nicht beachtet, sieht man sich unter Umständen mit scheinbar unerklärlichen Selbstnukleierungseffekten konfrontiert (Memory-Effekt).

Beim Abkühlen gelingt es den Polymerketten nicht, sich zu entschlaufen und Einkristalle zu bilden. So bilden sich lokal geordnete Bereiche (Kristalle aus Kettensegmenten) in einer Matrix aus ungeordneten (amorphen) Kettensegmenten mit oft verblüffend komplizierten (und eigenschaftsrelevanten) Überstrukturen wie z. B. Sphärolithen.

Rieger sagt dazu ganz deutlich, er sei in seiner Berufspraxis immer wieder verblüfft gewesen, wie wenig Beachtung diese morphologischen Aspekte bei vielen Kollegen in der Industrie aber auch in der Akademie finden. Diese multiskaligen Strukturen sind entscheidend für viele Eigenschaften der teilkristallinen Materialien (Transparenz, Mechanik, Rissbeständigkeit etc.).

Bei teilkristallinen Thermoplasten ergeben sich unter Umgebungsdruck bei relativ langsamer, allerdings in der DSC-Prüfung üblicher Abkühlgeschwindigkeit von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, die in Bild 1.37 dargestellten Kurven für die Schmelz- und Kristallisationspeaks für verschiedene Kunststoffe.

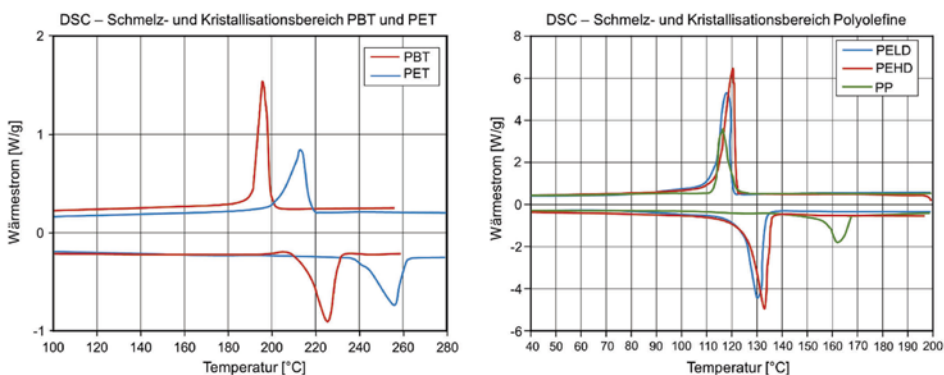


Bild 1.37 (Fortsetzung auf Seite 46)

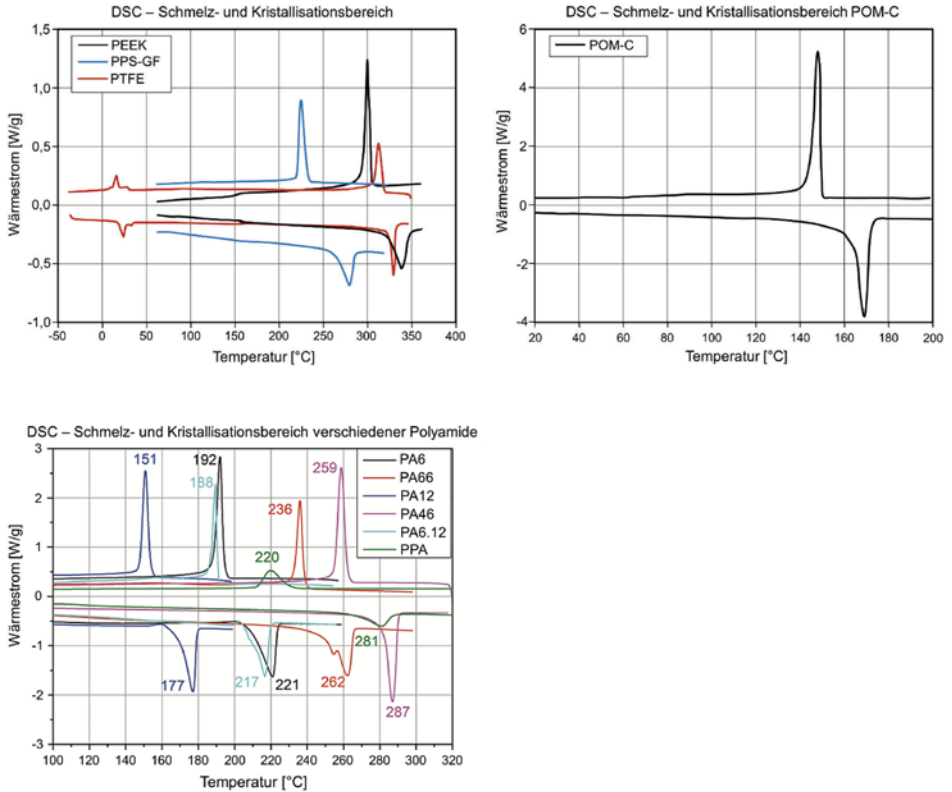


Bild 1.37 Schmelz- (oberer Temperaturwert) und Kristallisationstemperatur (unterer Temperaturwert) verschiedener Thermoplaste, 10 °C/min

Die Versuche in der DSC werden weitgehend unter Normaldruck durchgeführt. Die meisten Verarbeitungsverfahren arbeiten jedoch mit erhöhten Drücken, durchaus bis 3000 bar. Da sich der aufbrachte Druck schnell ausbreitet, viel schneller als Temperaturen, wirkt er auf die kristallisierende Schmelze und erhöht sowohl die Kristallisationsschmelztemperatur, soweit erstarrte Bereiche bereits vorliegen, als auch noch deutlicher die Kristallisationstemperatur, die die Kristallisation einleitet, Bild 1.38.

Eine freie Kristallisation quasi ohne Scherung oder Dehnung und ohne Druck ergibt sich beim Lasersintern, Bild 1.39. Die Lamellen wachsen ausgehend von einem Pulverpartikel. Die Lamellendicke selbst ist hier jedoch schwer zu erkennen. Zu sehen ist eine Laser-Scanning Aufnahme (Intensitätsaufnahme, deshalb sieht die Aufnahme wie ein schwarz-weiß Bild aus) einer Oberfläche eines Bauteils.

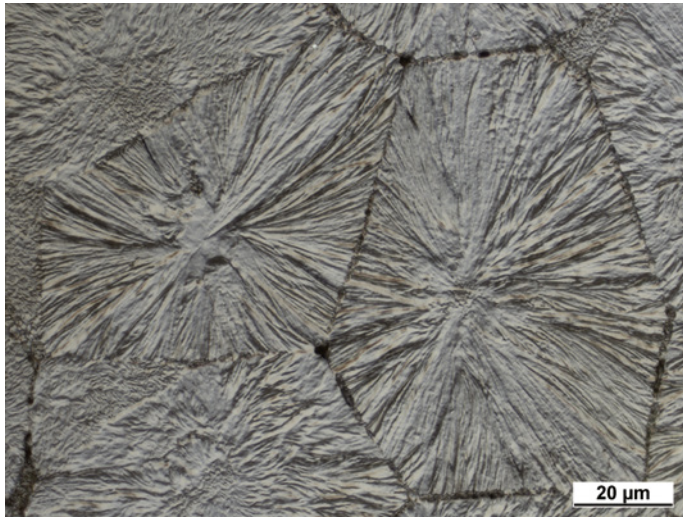


Bild 1.46 Lamellen- und Sphärolith-Bildung beim Lasersintern von PP bei 130 °C [Lanzl]

PP lasergesintert, nur mit Glasfasern gefüllt (PP-GF30, Trockenmischung, SLS, Querschnitt Zugstab, poliert und plasmageätzt). Man sieht, dass die Glasfasern die Lamellenbildung bzw. Kristallisation kaum beeinflussen.

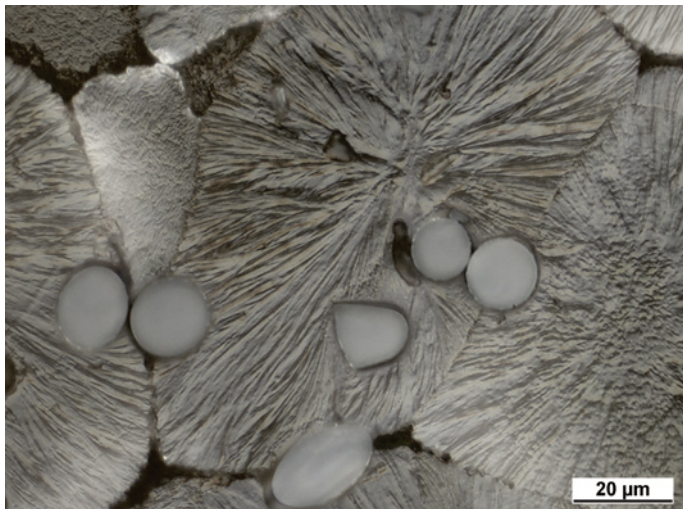


Bild 1.47 Lamellen- und Sphärolith-Bildung beim Lasersintern von PP-GF30 bei 130 °C [Lanzl]

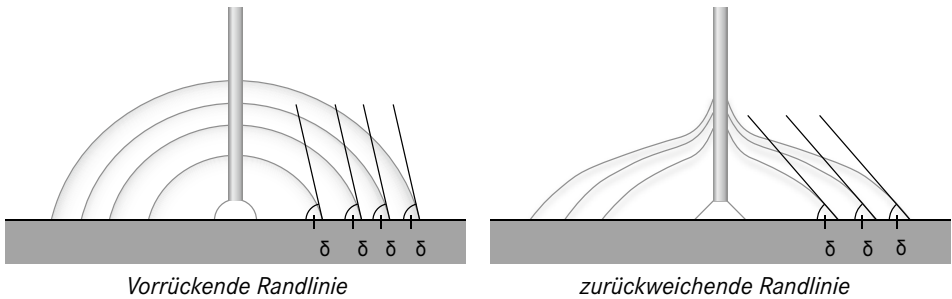


Bild 3.4 Schematische Darstellung des Vorrückwinkels δ_V und des Rückzugwinkels δ_R



Von Flüssigkeiten, also auch Kunststoffschmelzen, kann man die Oberflächenspannung eindeutig bestimmen; von festen Kunststoffsubstraten sind zwei Werte nötig (näheres in Abschnitt 3.2.8.3.2).

Die durch die Oberflächenspannungen bestimmten Funktionsgrößen sind die Adhäsionsarbeit, die Grenzflächenspannung und der Spreitungsdruck.

Die **Adhäsionsarbeit** kennzeichnet die physikalische Haftung zwischen zwei Komponenten. Im Bezug auf den Randwinkel ist dabei aber zu berücksichtigen, dass der Wert der Adhäsionsarbeit mit kleinerem Randwinkel zunimmt. Die Gefahr der Manipulation ist somit gegeben.

Die Grenzflächenspannung γ ist die freie Energie der Grenzfläche, die ihre Reduzierung begünstigt. Je niedriger sie ist, umso energetisch stabiler ist die Verbindung.

Der (Ausbreitungs-) **Spreitungsdruck** kennzeichnet das Potential zur Benetzung des Substrates.

Bild 3.5 kennzeichnet die einigermaßen komplizierten Beziehungen bei einem flüssigen Epoxidharzkleber auf festen Substraten mit unterschiedlichen Oberflächenspannungen und das Verhalten von Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Oberflächenspannungen auf einer Polycarbonatoberfläche.

Die Adhäsionsarbeit wird durch die Erhöhung der Oberflächenspannung beider Komponenten erhöht. Wenn sich die Oberflächenspannung der benetzenden Flüssigkeit praktisch nicht erhöht bzw. eine Flüssigkeit mit höherer Oberflächenspannung gewählt werden kann, diese aber häufig höher als die des Substrates liegt, muss die Oberflächenspannung des Substrates erhöht werden z. B. durch Oberflächenbehandlung oder Wahl eines anderen Substrates.

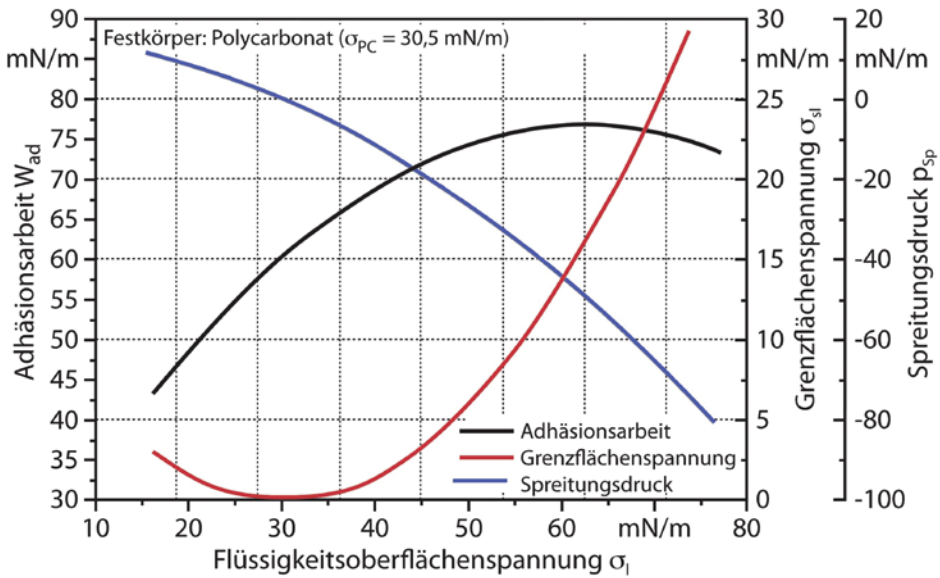
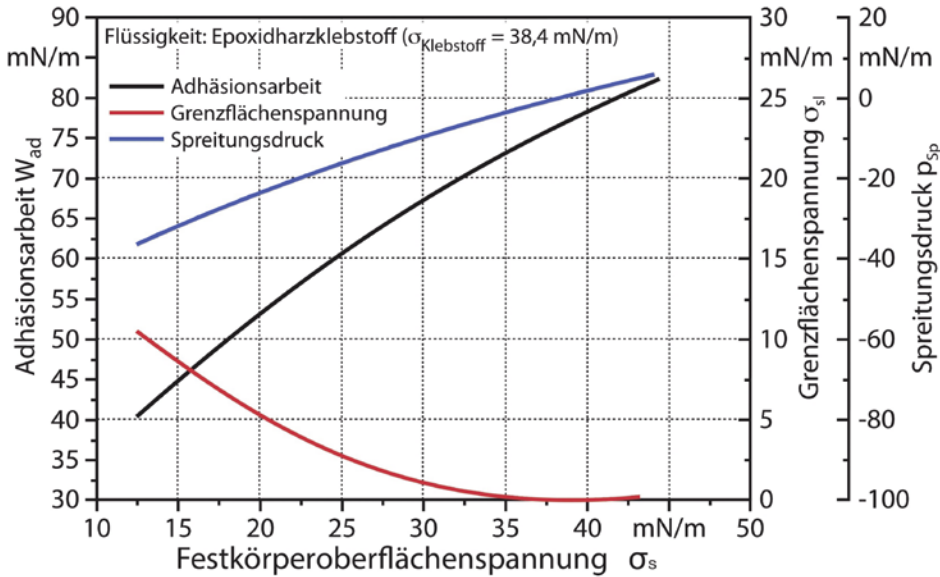


Bild 3.5 Adhäsionsarbeit [Dupré], Grenzflächenspannung [Neumann] und Spreitungsdruck in Abhängigkeit von der Oberflächenspannung, theoretische Werte.
 oben: EP-Harzklebstoff auf Substraten unterschiedlicher Oberflächenspannung
 unten: PC in Flüssigkeiten unterschiedlicher Oberflächenspannung

Wird ein symmetrischer Tropfen gleichmäßig von der Unterseite her erwärmt, so nimmt der Randwinkel unter Beibehaltung der Symmetrie ab, wird er abgekühlt, so nimmt der Randwinkel zu und es kann bei Überschreiten eines kritischen Randwinkels δ_{krit} zu einem Auseinanderfließen des Tropfens kommen. Dieses Verhalten beruht auf der veränderten Oberflächenspannung, die mit sinkender Temperatur zunimmt, und der Strömung von den wärmeren zu den kälteren Bereichen innerhalb des Tropfens, die zu einer Zirkulation führt, solange sich kein thermisches Gleichgewicht eingestellt hat (ähnlich Marangoni-Konvektion).

Liegt ein Temperaturgradient entlang der Unterlage vor, so wird sich aufgrund dieser Effekte ein unsymmetrischer Tropfen ausbilden, Bild 4.12. Die größere Oberflächenspannung des Flüssigkeitstropfens und der Drehsinn der Zirkulation vergrößern den Randwinkel δ_k im kalten Bereich der Unterlage, während der Randwinkel δ_w im warmen Bereich abnimmt. Wird im kalten Bereich der kritische Randwinkel δ_{krit} überschritten, so beginnt der Tropfen an dieser Stelle auszufließen. Wird die warme Begrenzungslinie nachgezogen, so bewegt sich der Tropfen wegen der Zirkulation gleichsam rollend in die Kälte.

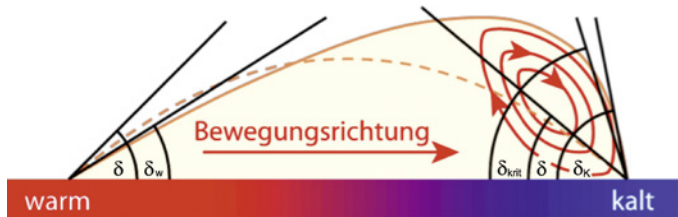


Bild 4.12 Verformung eines ursprünglich symmetrischen Tropfens (Randwinkel δ) aufgrund eines Temperaturgradienten in der Unterlage

δ_w, δ_k – Randwinkel der wärmeren und kälteren Tropfenzone

δ_{krit} – kritischer Randwinkel

■ 4.8 Kommunizierende Luftblase

Es werden eine kleine und eine große Luftblase (bzw. Seifenblase) miteinander verbunden. Zunächst sei die Verbindung geschlossen, die Blasen behalten ihre Größe bei. Nun wird die Verbindung geöffnet, man kann beobachten, dass die große Blase vergrößert und die kleine verkleinert wird.

Beispiel

Die eine Kugel hat den doppelt so großen Radius wie die andere. Wenn das Volumen der großen Kugel um 10 % zunimmt, um wie viel % nimmt dann das Volumen der kleinen Kugel ab bzw. um wie viel % nimmt die Oberfläche der großen Kugel zu und die Oberfläche der kleinen Kugel ab. Warum verschwindet die kleinere Kugel?

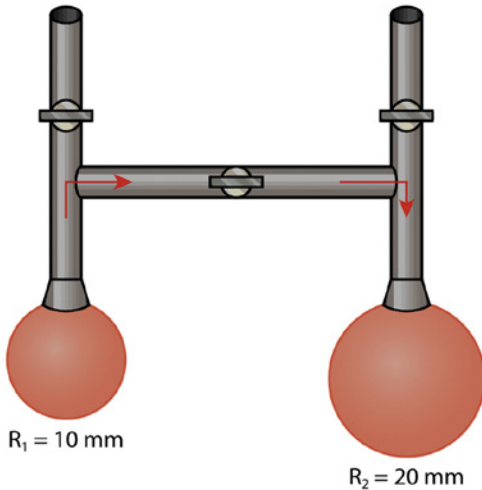


Bild 4.13

Darstellung des Verfahrens der kommunizierenden Luftblase

Das Volumen und die Oberfläche der Kugel werden nach den folgenden Formeln berechnet:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (4.3)$$

$$O = 4\pi R^2 \quad (4.4)$$

mit V - Volumen der Kugel [mm^3]
 O - Oberfläche der Kugel [mm^2]
 R - Radius der Kugel [mm]

Wenn das Volumen der großen Kugel um 10 % vergrößert wird, vergrößert sich ihre Oberfläche um $329,6 \text{ mm}^2$ (+ 6,6 %). Gleichzeitig verkleinert sich die Oberfläche der kleinen Kugel um $826,4 \text{ mm}^2$ (- 65,8 %), d. h. die Summe der Oberflächen beider Kugeln verkleinert sich insgesamt um $496,8 \text{ mm}^2$ (- 7,9 %) und bei gleicher Oberflächenspannung dementsprechend auch die potentielle Energie. Dementsprechend ist es energetisch günstig, wenn die kleinere Kugel verschwindet, weil beim Verkleinern der kleineren Kugel mehr Oberfläche verschwindet als beim korrespondierenden Vergrößern der großen Kugel entsteht.

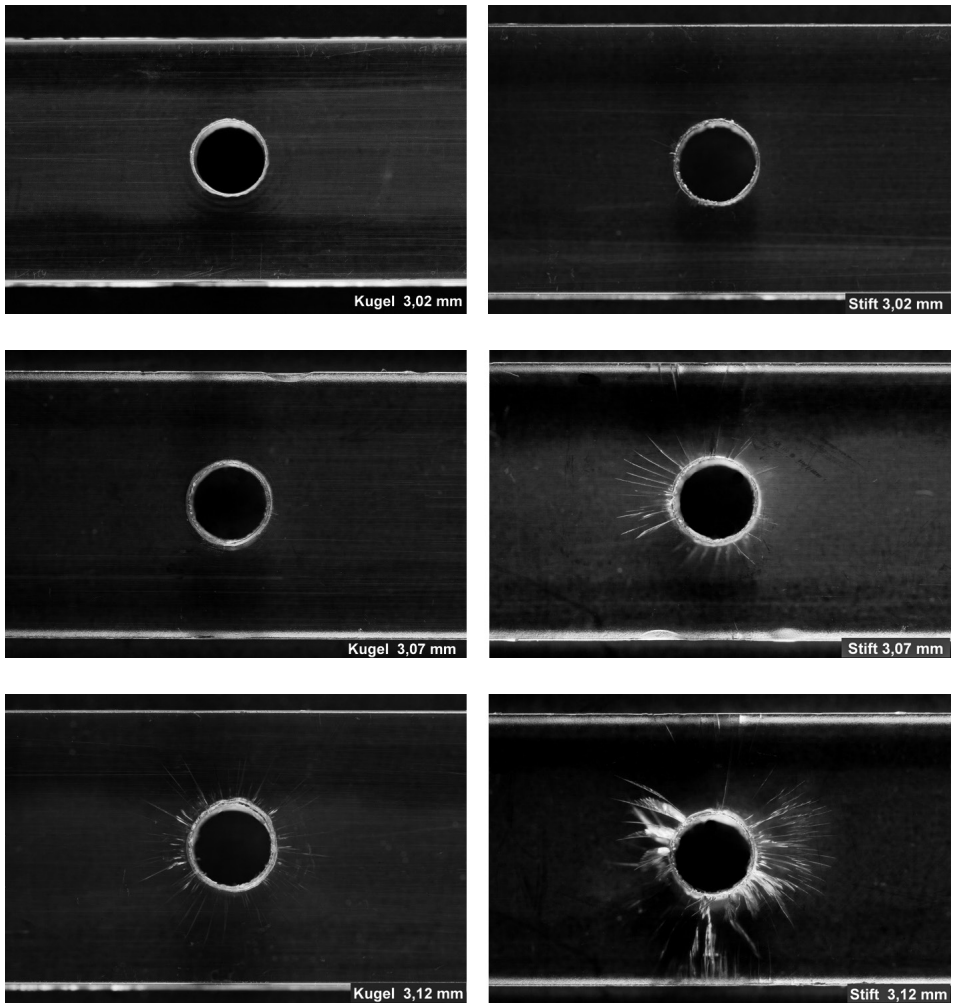


Bild 5.26 Vergleich der Spannungsrissbildung an einem Vielweckkörper beim Kugleindruckverfahren (links) bzw. beim Stifteindruckverfahren (rechts)

Material PC, Typ Makrolon® 2805;

Lagermedium: Toluol/n-Propanol 1:3/15 Minuten

Um den Einfluss von Chemikalien auf Kunststoffe unter Crazebildung zu prüfen, kann die Probe nach dem Entfernen des Stiftes oder der Kugel aus dem Bohrloch nach einem Verfahren wie dem Zugversuch geprüft werden, der einen Vergleich mit dem Kunststoff im Ausgangszustand zulässt. Bei einem Standard-PC ergeben vergleichende Messungen den deutlichen Einfluss von Crazes auf die mechanische Materialbelastung in der für sie kritischen Form, der Zugbeanspruchung, Bild 5.27.

Index

Symbole

2K-Acrylharzkleber 244
 α -Kristalllamellen 52
 β -Nukleierung 52

A

Abkühlgeschwindigkeit 35, 45, 49
Abkühlprozess 17
Abkühlung 41
ABS 208
ABS ([®]Terluran 877T) 77
Adhäsion, Benetzung 120
Adhäsionsarbeit 122, 132 ff., 136, 138
Adhäsionskräfte 54
Aggregatzustände 11
Alkalilogenide 51
allowable strain 69
Altstädte 267
amorphe Anteile 224
amorphe Bereiche 5
amorphe Polymere 12
amorphe Strukturen 205
amorphe und kristalline Anteile 41
Anisotropie 65, 98
Anlösen 152
Anwendungsbeispiele 259
Arbeitsaufnahme-Vermögen 64
Äther 231
Auslenkwinkel 16
Aussagemöglichkeiten 257
Auswertverfahren 178

B

Bauteilsicherheit 97
Begrenzungsflächen 205
Belastungsgeschwindigkeit 66
Bell-Test 229, 252
Bemessungskennwerte 87
Benetzbarkeit 51
Benetzung 138
Benetzungswinkel 122
Benzin 231
Berstfestigkeit 88
bewährte Prüfverfahren 60
biaxialer Durchstoßversuch 65
Biegebalken-Test 254
Biegebeanspruchung 87
Biegefestigkeit 3
Biegeschablone 239
Biegestreifenmethode 233
Biegestreifenverfahren 236, 238, 258
Biegeversuch 62, 63
blumenartige Crazes 266
Brandverhalten 60
Bruchdehnung 5, 66
Bruchformen 90
bunte Bilder 40

C

Campingpumpe 262
CAMPUS 107
Cauchy 90
Chlorsulfonsäure 28
Clarifier 51
Coating 133
Conpoundierung 59
Crazebildungszeit 257

Crazes 205
Crazespitze 225

D

Dallner 77
Dämpfung 5, 14
Dataphysics 119
Dehnströmung 44
Dichte [g/cm^3] 148
Dichte-Messung 40
Dicke 2
Diiodmethan 150
Dipol 222
Dispergierung 133
dispers 120
Dispersion 222
Dispersionskräfte 134
dispersiv 120, 134, 162
Dow-Säbel 252
Dreipunktversuch 95
Drucken 133
Druckfestigkeit 3, 61f.
Druckkegel 61
DSC 40
DSC-Messgeräte 49
DSC-Messung 14, 40
Dupré 122, 133
Durchstoßversuch 64f.
Durchstrahlverklebung 179
Duroplaste 9, 11, 98
dynamische Randwinkelmessung 152, 156
Dynema-Faser 43

E

Ehrenstein 78
Eigenerwärmung 27
Eigenschaftsbild 1
einachsig - zweiachsig 65
Einbrennlackieren 98
Einfrierbereich 5, 11
eingefrorene Orientierungen 8
Einsatzgrenze 5
einstufig 235
Elastizitätsmodul 66f.
Elastomere 11
Elastomer-Modifikationen 267
elektrische Eigenschaft 60

Elektronenbestrahlung 172, 221
Elektronenmikroskope 12
E-Modul 2
E-Modul-Messung 91
energieelastische Zustandsbereiche 4, 12, 70
Entfetten 245
Entropie 12
Entropieelastizität 6
entropie-/gummielastischer Zustand 3, 10, 70
Entschlaufung 217
EP-Harz 167
Epoxidharz 136
Erhard 78
erhöhte Drücke 46
Ermüdungsverhalten 267
ernergieelastischer Glaszustand 12
Erweichungsbereich 5, 11
Ethanol 165
E. W. Fischer 37
Extrakt 59
Extrapolation 216

F

Fa. Krüss GmbH 119
Faltungen 2
Faltungslamellen 28
Farbe 60
Farbpigmente 39
Faserorientierung 44
Faustregeln 138
Fertigteil 255, 259
Fertigungsprozess 88
feste Kunststoffe 150
fester und schmelzflüssiger Zustand 168
fester Zustand 5
Festigkeit 14, 90
Festigkeitsanisotropie 64
Festkörper 134
Feststoffe 121, 240
Feuchtigkeit 209
fibrilläre 212
Fibrillen 206
Fibrillenbildung 208
Fibrillendichte 267
Fiso/A 99
Flash-DSC 39f.

Fließbereich 7
Fließtemperatur 11, 13, 15 f.
Fließzustand 26
Flugzeugfrontscheibe 260
Flüssig-fest-Grenzfläche 132
Flüssig-fest-Phasengrenze 133
Flüssigkeiten 121, 134
folienförmig 212
Formänderungen 4
Formbeständigkeit in der Wärme 76, 79, 99
Formgebungsprozess 86
Formmassen 59
Formteilentwicklung 88
Formteilkennwerte 60, 86
Formteilprüfung 59
Forschungsgremien 86
Fox und Chrisman 140
freies Volumen 6, 11
Frese 152
FTIR 39 f.
Füllstoffe 59
Fußpunkt 155

G

gasförmige Substanzen 209
gebräuchliche Prüfverfahren 234
Gebrauchstauglichkeit 256
Gebrauchstemperaturen, zulässige 78
Gelpunkt 9
genormte Prüfverfahren 72
Gestaltänderungshypothese (Huber) 64
Gestaltungsvariation 86
Gierl 93
Glasfasern 59
Glashohlkugeln 172
Glasübergang 10
Glasübergangsbereich 5, 74
Glasübergangstemperatur 6 f., 17, 68, 70, 74, 77
Glaszustand 26
Gleichgewichtsrandwinkel 152
Gleichung des harmonischen Mittels 164
Gleichung von Fowkes 163
Goniometer 165
Goniometer der Fa. Krüss 154
Graphit 51
Grenzflächen 218
Grenzflächenspannung 121, 132 ff., 136

Grenz-Übermaß 250
gummielastischer Zustand 12, 26, 74

H

Haftung 133, 138
Hängender-Tropfen-Methode (Pendant-Drop) 143, 148
Harkins und Jordan 140
Hauptvalenzbindungen 2
Heizkörperhalter 259
Heizrate 74
Heptan 231
Hexan 231
Hubert F. Jordan 140
hydrophile Beschichtung 133
hydrophobe Beschichtung 133

I

idealelastische 8
identifizierbar 226
Induktionszeit 205
innere Spannungsrisbildung 207
Inserts 263
ISO 75-Werte 78

J

Jeltsch-Fricke 164

K

Kanig 32
Kapillarkonstante 161
Kautschukpartikelchen 209
Kautschukpartikelgröße 210
Keimbildner 51
Keimbildungstemperatur 42
Keimbildungswachstum 43
keine Korrosion 209
Kennwertermittlung 66
Kerbschlag-Zähigkeitsversuche 64
Kettenbeweglichkeit 29
Kettenentschlaufung 223
Kettengleichmäßigkeit 267
Kettensegmente 11
Khanna 49 f.
KIMM 257

Kleben 133
 Knäuel 2, 12
 Knäuelauflösungen 16
 Knäueldurchmesser 33
 Knäuelverformungen 12
 Knäuelzustand 6
 Kohäsionsarbeit 134
 Kohlendioxid 209
 Kohlenstoff 2
 komplexe Strukturmerkmale 27
 Konformation 6
 Konformationsänderungen 11, 26
 Konstante 134
 konstruktive Gestaltung 1
 Kontaktwinkel 122, 133 f., 158
 Kontaktwinkelhysterese 135, 169
 Kontaktwinkelmessgerät 166
Körbel 35
 Kriechmodul 67, 210
 Kriechneigung 210
 Kristallisation 18
 Kristallisationsbildung 42
 Kristallisationsgeschwindigkeit 41, 48
 Kristallisationsgrad 40, 218
 Kristallisations-Peaks 45
 Kristallisationstemperatur 49, 50
 Kristallitwachstums-Geschwindigkeit 42
 Kristallwachstum 29
 kritische Dehnung 69, 228
 Kugeleindrückverfahren 242, 248
 Kugeln 244
 Kugel- oder Stifteindruckverfahren 233, 236, 258
 Kunststoff 99
 Kunststoffe im festen und flüssigen Zustand 166
 Kunststoffe und Metalle 97
 Kunststoffprüfer 87
 Kunststofftechnik 86
 Kunststoff-Zugprobekörper 89
 Kurzketten-Verzweigungen 267

L

Lackierung 133
 Lamelle 26, 28, 148
 Lamellenbilder 32
 Lamellenbildung 29
 Lamellendicken 31

Lamellenebene 33
 Lamellenhöhe 31, 35
 Lamellen-Methode 144
 Lamellenstruktur 31, 36
 Länge 2
 Längenausdehnungskoeffizient 99
 langsamere Abkühlung 38
 Lebensdauer 237
 Leichtbaukonstruktionen 97
 Leisen 93
 Lexan 123R 16
 Liegender-Tropfen-Methode 153, 159
lllers 30
 London-Kräfte 134
 Lösemittel 217, 231
 lösende Chemikalien 205
 Löslichkeit 222
 Löslichkeitsparameter 219 f., 222
 Lösungsmittel 205
 Lösungsviskosität 59

M

makrobrownschen Bewegungen 16
 Makromoleküle 2
 Masse- und Werkzeugtemperatur 87
 Maßhaltigkeit 60
 Material-Modifikation 86
Mattner 38
 MDSC 25
 mechanische Eigenschaft 60
 Medienaufnahme 224
 medienfreie Spannungsrisssbildung 207
Medina Hernandez 54 f.
 mehrachsiger Spannungszustand 208
 mehrachsiger Zugspannungszustand 209
 Menges 69
 Metallkorrosion 262
 Methanol 231
 Methode des Hängenden-Tropfens 142
 Methode des Liegenden-Tropfens (Sessile-Drop-Methode) 156
 Methodenübersicht 1
Micheler 224
 mikrobrownsche Bewegung 5 f., 11
 Mikrobürettenschraube 155
Mises-Henky 64
 Molekulargewicht 15, 22, 36, 49, 218, 220, 267

Molekülverwirbelung 61
Moneke, Grabski 47
Mörl 44, 52
Multipoint 104

N

nach A. Ohm 147
nach F. M. Fowkes 147
nach H. J. Busscher 147
nach J. R. Chen 147
nach W. Rabel 147
Nachttemperung 225
Nagelprobe 61
Nebervalenzbindungen 2
Nekanil W. 230
Neumann 122, 133, 163, 177
Neumann II 135
n-Hexan 161
Nichtlöser 231
niedrige Werkzeugtemperatur 38
n-Perfluorooctan 161
n-Perfluorohexan 161
n-Propanol 245
N. Rudolph (das Rudolph-Phänomen) 16
Nukleierung 51
Nukleierungsdichte 52
Nukleierungsmittel 49, 52
Nullpunktmodul 67

O

Oberbach 63, 78 f., 86 ff.
Oberflächenbehandlung 133
Oberflächenenergie 119 f.
Oberflächeninhomogenitäten 157
Oberflächenspannung 2, 42, 54, 119 f., 134,
148, 222
Oberflächen-Spannungsrisse 207
Oberflächenstruktur 51
OCA 20 142
Ölsäure 231
olycarbonat 136
Owens 122, 133, 177
Owens/Wendt 135, 164

P

PA 6 49, 170
PA 12 14
PA-GF und PBT-GF 44
Pasten 240
PBT 156, 168, 170
PBT ([®]Pocan B1501) 77
PC 15, 169, 220, 248
PC-Makrolon 25
PE 225
PEHD 33
PEI/PEEK-Blends 217
PE-LLD 225
PE, PP, PVDF 37
PET 49
Pflanzenöle 231
Phenolharz 154
Plasmabehandlung 177
Platte-/Platte-Messsystem 16
PMMA 23, 25, 68, 211
polaren 134
Polarität 134, 178
Polyamid 229
Polyamid 66 27
Polyethylene 230
Polypropylen 18
Polystyrol 230
PP 32, 51, 94
PP-GF 44
PPO 220
PP-PEG-Gemisch 54
praktische thermische Einsatzgrenzen 6
Probekörper 107, 258 f.
Probengeometrien 60
Probleme bei der Messung 152
Produktvergleich 90
Prozesskontrolle 60
Prüfflüssigkeit 242
Prüfgeräte 258
Prüfmedium 226
Prüfmethoden 233
Prüfverfahren 257
Prüfverfahren zum thermischen Verhalten 60
Prüfzeit 216
PS 169, 208
PSU 220
pulverförmige Materialien 159
pvT-Gerät 25

Q

Quarz 51
 Quarzmehl 160, 172
 Quecksilberdampf-Kurzbogenlampe 178

R

Ramsteiner 223
 Randfaserdehnung 221
 Randwinkel 122
Ranft 94
 Rangordnungsprüfung 216
 Rauheit der Oberfläche 172
 Rauigkeit 155
 Reaktionsharze 167
 Referenzmedien 216
 Referenzprobekörper 240
 Reinigung 133
 REM-Aufnahmen 52f.
 Restmonomeren 59
 Richtwerte für Anwendungs-Temperatur-
 bereiche 99
Rieger 32
 Ringabreiß 148
 Ringabreiß-Methode 139
 Ringmethode von Lecomte de Noüy 138
 Risse 205
 Rissspitze 225
 Rohstoffe 59
 Rohstoff-Lieferanten 1
 röntgenographisch 47
 Rotationsviskosimeter 16, 25
 Rückziehen 159
 Rückzugswinkel 135, 152, 170
Rudolph-Phänomen 19, 22ff.
 Rundloch 243
 Ruß 51

S

Säbeltest 240
 SAN 169, 206, 208
 Sauberkeit 60
 SB 207
 Schadenslinien 216
 Schadensverursacher 205
 Schergeschwindigkeiten 15
 Scherviskosität 24

Schlagbiegeversuch 65, 241
 Schmelz- bzw. Erstarrungstemperatur 14
 Schmelzestand 10
 Schmelz-/Fließtemperatur 11
 schmelzflüssig 70
 Schmelztemperatur 11, 15, 29, 31f.
 Schnellzerreißmaschine 60
 Schubfestigkeit 63
 Schubmodul 14
 Schubmodul-Kurven 72
 Schubspannung 3
 Schulterstäbe 239
Schwarzl 12f., 29
 Sedimentationseffekte 152
 Seitengruppen 36
 Sekantenmodul 66f.
 Shish-Kebab-Strukturen 43
 sichtbare Schädigungen 240
 Singlepoint 104
 spannungsrisseanfällige Kunststoffe 227
 Spannungsrisssbildung 225
 Spannungsrisse (engl. crazes) 68, 205
 Spannungsrissempfindlichkeit 225
 spannungsrisssförderndes Medium 207
 Spannungsrisssprüfverfahren 233
 Spannungszustand 257
 Speichermodul 5
 Speichermodul G' 19
 Spez. Wärmekapazität 99
 Sphärolithe 218
 Sphärolithgröße 39
 Sphärolithsektoren 39
 Spreitung 120
 Spreitungsdruck 120, 133, 136, 138
 Spritzgießprozess 60
 statische Randwinkelmessung 156
 Steifigkeit 90
 Steighöhenmessgerät 157
 Steighöhenverfahren 157f.
 Stellgetriebe 261
 Stempel 148
 Stempel-Methode 146
 Stick-Slip-Effekte 155
 Stifte 245
 Stifteindruckverfahren 242f., 248
 Stiftübermaße 247
 Stirnabzugversuch 180
 Störungen 33
 Streckdehnung 66

Streckspannung 64
Streubreite 135
Strobl 28
Strukturparameter 88, 90
Strukturviskosität 44
syndiotaktisches PP 52

T

Talkum 51
Tangentenmodul 67f.
Temperaturbereich T [°C] 148
Temperatureinflüsse 97
Tensiometer 138
Testflüssigkeit 147f.
Testtinten 172
Testverfahren 147
thermal application limits 72
thermische Eigenschaft 60
thermische Einsatzgrenze 72, 76, 78
thermische Kennwerte 25
Thermoplastische Prüfkörper 98
tie-Moleküle 218
Titanoxid 51
Toluol 245
Toluol-Propanol 206
Transkristallisation 39

U

Übergangsbereiche 11
Übertragbarkeit 98
Ungeklärtes Phänomen 265
UP-Harz 167
Uranylacetat 28
UV-EP-Klebstoff 177
UV-Stabilität 15

V

van Krevelen 42
Varga-Täuschungsphänomen 38
Verarbeiter 205
Verdunstung 152
Verfahren nach Wu 164
Verformungsgeschwindigkeiten 60
Verlustfaktor 5
Verlustmodul 5, 14
Verlustmodul G'' 19

Vernetzungen 9
Vernetzungspunkte 12
Verschlaufungen 7, 12f., 22
Vicat 76
Vicat/B 99
Vierpunktprüfung 96
viskoelastisch 8
viskoelastisches zeitabhängiges Verformungsverhalten 87
viskose Verformbarkeit 224
Vorgehensweise 107
Vorrücken 159
Vorrückwinkel 135, 152, 170

W

wahren Kontaktwinkel 152
wahre Oberflächenspannung 152
Wärmeformbeständigkeiten 76
Wärmeleitfähigkeit 99
Wasser 59, 165
Wasserstoff 2
Wasserstoffbrücken 134, 222
Wasserstoffbrückenbindungen 51
Wassertropfen 154
Waters 140
WAXS 39, 40
Wechselbiegeversuche 62
Weichmacherwirkung 223
Weißbruch 208
Wendt 122, 133, 177
Werkstoffauswahl 1
Werkstoffkennwerte 86
Werkstoffprüfung 60
Werkstoffwissenschaftler 88
Wilhelmy-Plättchen 148
Wilhelmy-Plättchen-Methode 141
William D. Harkins 140
Wu 122, 133, 135, 177

Y

Young 122, 133f.
Young-Dupré'sche-Gleichung 133
Young-Laplace-Gleichung 142
Young'sche Gleichung 121
Young'sche Randwinkel 152
Young'scher Winkel 170

Z

- Zähigkeitskennwerte 64
- Zeitabhängigkeit 152
- Zeitstandversuch 236
- Zeitstandzugversuch 233, 237, 258
- Zugbereich 258
- Zugfestigkeit 2, 3
- Zug-Probekörper 3
- Zugproben 93
- Zugspannung 205
- Zugversuch 61, 89f.
- Zuidema 140
- zulässige Dehnungen 69
- Zustandsbereiche 3, 5, 9, 26
- zweistufige Versuche 235
- zwischenmolekulare Bindungen 22