

Friedrich Rudolf Schwarzl

# POLYMER- MECHANIK

Struktur und mechanisches Verhalten  
von Polymeren

Mit 266 Abbildungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong

Professor Dr. Friedrich Rudolf Schwarzl

Institut für Werkstoffwissenschaften V  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Lehrstuhl für Kunststoffe  
Martensstraße 7  
8520 Erlangen



ISBN 3-540-51965-3 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York  
ISBN 0-387-51965-3 Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Schwarzl, Friedrich Rudolf:

Polymermechanik : Struktur und mechanisches Verhalten von  
Polymeren / Friedrich Rudolf Schwarzl. – Berlin ; Heidelberg ;  
New York ; London ; Paris ; Tokyo ; Hong Kong : Springer,  
1990

ISBN 3-540-51965-3 (Berlin ...)

ISBN 0-387-51965-3 (New York ...)

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990

Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Satz: Fotosatz-Service Köhler, Würzburg-Heidingsfeld

Druck: Saladruk Steinkopf & Sohn, Berlin

Binearbeiten: Lüderitz & Bauer, Berlin

2151 3020-543210 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

# Inhaltsverzeichnis

Teil I Molekularstruktur und Aggregatzustände von Polymeren		
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Literaturauswahl	1
1.2	Historisches	1
1.3	Einteilung der makromolekularen Stoffe	2
1.4	Kurzzeichen, Firmenbezeichnungen	3
1.5	Ökonomische Bedeutung makromolekularer Stoffe	4
1.6	Die Rolle der Kunststoffe in der Ökologie	7
1.7	S.I.-Einheiten	10
1.8	Literatur	12
<b>2</b>	<b>Molekularmasse und räumliche Gestalt der Makromoleküle</b>	<b>13</b>
2.1	Die Molekularmasse und ihre Verteilung	13
2.2	Räumliche Gestalt und mikrow Brownsche Bewegung der Makromoleküle	22
2.3	Taktizität der Vinylpolymeren	24
2.4	Literatur	25
<b>3</b>	<b>Das Makromolekül in Lösung</b>	<b>26</b>
3.1	Verdünnte Lösungen	26
3.2	Thermodynamische Eigenschaften der Lösung	27
3.3	Osmometrie	33
3.4	Viskosimetrie	41
3.5	Lichtstreuung	51
3.6	Gel-Permeations-Chromatographie	56
3.7	Literatur	61
<b>4</b>	<b>Die statistische Gestalt der Makromoleküle</b>	<b>62</b>
4.1	Die Irrflugkette	62
4.2	Die statistische Gestalt der Makromoleküle in $\theta$ -Lösung	67
4.3	Die statistische Gestalt der Makromoleküle in guten Lösungen	73
4.4	Gestalt der Makromoleküle im Glaszustand, im gummi-elastischen Zustand und in der Schmelze	73
4.5	Literatur	74

<b>5</b>	<b>Struktur und Aggregatzustände der makromolekularen Stoffe . . .</b>	<b>75</b>
5.1	Einteilung der makromolekularen Stoffe . . . . .	75
5.2	Strukturbild der amorphen Polymere . . . . .	84
5.3	Aggregatzustände der unvernetzten, amorphen Polymere . . . . .	86
5.4	Einfluß von Molekulargewicht und Vernetzung . . . . .	92
5.5	Struktur der teilkristallinen Polymere . . . . .	96
5.6	Aggregatzustände der teilkristallinen Polymere . . . . .	101
5.7	Literatur . . . . .	107
<b>6</b>	<b>Spezifisches Volumen der makromolekularen Stoffe . . . . .</b>	<b>108</b>
6.1	Dilatometrie . . . . .	108
6.2	Das spezifische Volumen amorpher Polymerer . . . . .	110
6.3	Das spezifische Volumen teilkristalliner Polymerer . . . . .	118
6.4	Literatur . . . . .	120
Teil II	Technische Mechanik von Polymeren . . . . .	121
<b>7</b>	<b>Das Zug-Dehnungs-Verhalten von Polymeren . . . . .</b>	<b>123</b>
7.1	Der Zugversuch . . . . .	123
7.2	Zug-Dehnungs-Diagramm von Stahl . . . . .	124
7.3	Zug-Dehnungs-Verhalten von Polymeren . . . . .	125
7.4	Beschreibung des Deformationsverhaltens von Polymeren . . . . .	129
7.5	Literatur . . . . .	130
<b>8</b>	<b>Lineares visko-elastisches Deformationsverhalten der Polymere in einfacher Scherung . . . . .</b>	<b>131</b>
8.1	Kriech- und Erholungsversuch; Spannungsrelaxation . . . . .	131
8.2	Das Superpositionsprinzip . . . . .	136
8.3	Spektren . . . . .	141
8.4	Das Kriecherholungsexperiment . . . . .	147
8.5	Verlauf der Kriechfunktion für amorphe Polymere . . . . .	149
8.6	Der Zusammenhang zwischen Kriechen und Relaxation. . . . .	164
8.7	Schwingungsmessungen. . . . .	172
8.8	Näherungsgleichungen zwischen meßbaren charakteristischen Funktionen . . . . .	182
8.9	Das Scherverhalten von amorphen Polymeren . . . . .	192
8.10	Literatur . . . . .	200
<b>9</b>	<b>Zeit-Temperaturverschiebung der mechanischen Eigenschaften . . .</b>	<b>202</b>
9.1	Das Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip. . . . .	202
9.2	Zeit-Temperatur-Verschiebung für den Glas-Kautschuk- Übergang . . . . .	204
9.3	Zeit-Temperatur-Verschiebung für den Fließvorgang . . . . .	211
9.4	Zeit-Temperatur-Verschiebung sekundärer Relaxationsprozesse im Glaszustand . . . . .	215
9.5	Lage der Aggregatzustände amorpher Polymerer im Zeit-Temperatur-Diagramm . . . . .	222
9.6	Literatur . . . . .	223

<b>10</b>	<b>Lineares visko-elastisches Verhalten isotroper Stoffe unter dreidimensionalen Spannungszuständen.</b> . . . . .	224
10.1	Komponenten des Spannungstensors und Gleichgewichtsbedingungen . . . . .	224
10.2	Der Deformationstensor (für kleine Deformationen). . . . .	228
10.3	Zustandsgleichungen für isotrope, linear elastische Stoffe bei kleinen Deformationen (Hookesche Theorie) . . . . .	231
10.4	Zustandsgleichung für isotrope, linear visko-elastische Stoffe bei kleinen Deformationen . . . . .	233
10.5	Einfache Scherung . . . . .	235
10.6	Isotrope Kompression . . . . .	235
10.7	Einachsige Dehnspannung (der Zugversuch) . . . . .	237
10.8	Verlauf der visko-elastischen Funktionen für amorphe, unvernetzte Polymere . . . . .	241
10.9	Literatur . . . . .	243
<b>11</b>	<b>Die Torsion von Stäben</b> . . . . .	244
11.1	Elastischer, kreiszylindrischer Stab . . . . .	244
11.2	Visko-elastischer, kreiszylindrischer Stab . . . . .	246
11.3	Torsion von rechteckigen Stäben . . . . .	247
11.4	Das Torsionskriechexperiment . . . . .	249
11.5	Freie gedämpfte Torsionsschwingung (Torsionspendel) . . . . .	253
11.6	Literatur . . . . .	259

### Teil III Thermische Eigenschaften von Polymeren

<b>12</b>	<b>Spezifisches Volumen von Polymeren</b> . . . . .	261
12.1	Druck- und Temperaturabhängigkeit des spezifischen Volumens . . . . .	261
12.2	Eigenspannungen in Polymeren . . . . .	266
12.3	Literatur . . . . .	270
<b>13</b>	<b>Spezifische Wärme</b> . . . . .	271
13.1	Spezifische Wärme von Polymeren. . . . .	271
13.2	Literatur . . . . .	278
<b>14</b>	<b>Wärmeleitung</b> . . . . .	279
14.1	Wärmeleitfähigkeit von Polymeren . . . . .	279
14.2	Wärmeleitung im ruhenden Medium . . . . .	283
14.3	Wärmeleitung und Wärmetransport im strömenden Medium . . . . .	287
14.4	Literatur . . . . .	288

### Teil IV Das Verhalten der Elastomere und der Polymerschmelzen bei großen Deformationen

Literatur . . . . .	289
---------------------	-----

<b>15</b>	<b>Die Grundlagen der Theorie der großen Deformationen . . . . .</b>	<b>291</b>
15.1	Kinematik der großen Deformationen . . . . .	291
15.2	Deformationsgradient und Deformationstensoren . . . . .	295
15.3	Deformationsgeschwindigkeitstensoren . . . . .	300
15.4	Einfache Deformations- und Strömungstypen . . . . .	302
15.5	Dynamik deformierbarer Media; die Erhaltungssätze . . . . .	304
15.6	Hauptachsentransformation des Spannungstensors . . . . .	312
15.7	Hauptachsentransformation der Deformationstensoren und des Deformationsgeschwindigkeitstensors . . . . .	318
15.8	Literatur . . . . .	322
<b>16</b>	<b>Große Deformationen elastischer Stoffe . . . . .</b>	<b>323</b>
16.1	Rheologische Zustandsgleichung für isotrope, rein elastische Stoffe . . . . .	323
16.2	Die rheologische Zustandsgleichung für den idealen Kautschuk . . . . .	326
16.3	Statistische Theorie der Kautschuk-Elastizität . . . . .	331
16.4	Literatur . . . . .	337
<b>17</b>	<b>Das rheologische Verhalten der Polymerschmelzen . . . . .</b>	<b>338</b>
17.1	Rheologische Zustandsgleichung für isotrope, rein viskose Flüssigkeiten . . . . .	338
17.2	Rheologische Zustandsgleichung der elastischen Flüssigkeit nach Lodge . . . . .	339
17.3	Die zeitabhängige, einfache Scherung der Lodge-Flüssigkeit . . . . .	345
17.4	Das Viskositätsverhalten der Polymerschmelzen . . . . .	354
17.5	Rheologische Zustandsgleichung der visko-elastischen Flüssigkeit nach Wagner . . . . .	366
17.6	Literatur . . . . .	381
<b>18</b>	<b>Viskosimetrie . . . . .</b>	<b>383</b>
18.1	Das Couette-Viskosimeter . . . . .	383
18.2	Das dynamische Viskosimeter . . . . .	388
18.3	Das Kapillar-Viskosimeter . . . . .	395
18.4	Das Schlitz-Viskosimeter . . . . .	402
18.5	Das Platten-Viskosimeter . . . . .	406
18.6	Das Kegel-Platte-Viskosimeter . . . . .	410
18.7	Literatur . . . . .	416
	Nachweis übernommener Abbildungen . . . . .	417
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>421</b>