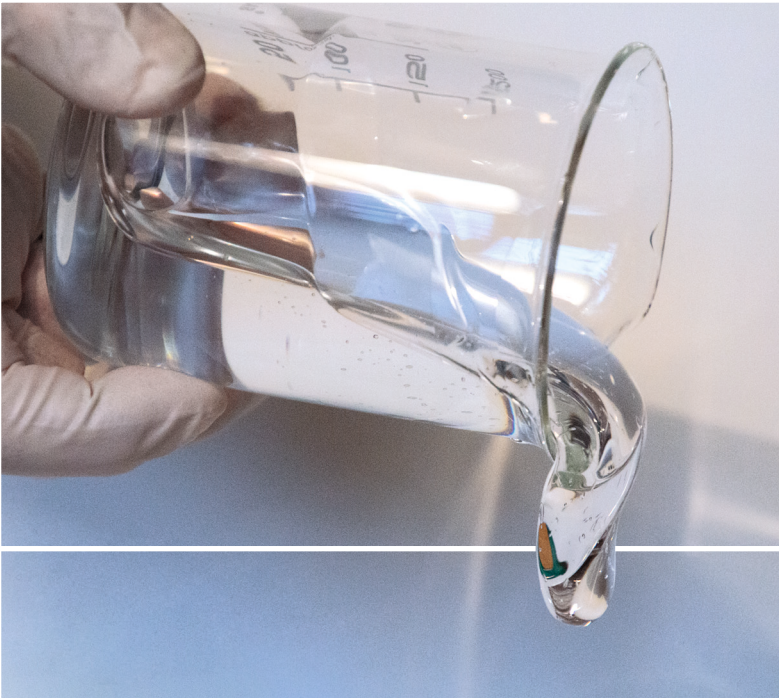


Gottfried W. Ehrenstein  
Dietmar Drummer  
Michael Gehde  
Lothar Gehm



# Viskosität



HANSER



Ehrenstein/Drummer/Gehde/Gehm  
**Viskosität**



**bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**

## **Die Internet-Plattform für Entscheider!**

**Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

**Richtungsweisend:** Fach- und Brancheninformationen  
stets top-aktuell!

**Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue  
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

***Kunststoffe.de***

Gottfried W. Ehrenstein  
Dietmar Drummer  
Michael Gehde  
Lothar Gehm

# Viskosität

HANSER



Print-ISBN: 978-3-446-47272-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-47290-7

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also 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 benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Dr. Mark Smith

Herstellung: Cornelia Speckmaier

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © Lothar Gehm

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

# Gedenkwort

Prof. Ehrenstein hat das Verständnis der Kunststofftechnik, wie wir sie heute kennen, maßgeblich mitgeprägt. Das Zusammenwirken von Konstruktion, Kunststoff und Verarbeitung zu Erzielung spezifischer Produkteigenschaften ist Schlüssel zum Erfolg in der Bauteilentwicklung. Die Methoden der Schadensanalytik nutzen diese Zusammenhänge retrograd aber auch in der Ermittlung von Schadensursachen.

Wichtige Instrumente zur Ermittlung dieser Zusammenhänge liegen in den Verfahren der Kunststoffanalytik. Prof. Ehrenstein war es immer wichtig herauszustellen, wie sich innere Eigenschaften der Kunststoffe wie z. B. Morphologie, Orientierungen, Eigenspannungen oder auch Fehlstellen aus Konstruktion, Kunststoff und Verarbeitungsprozess herausbilden und wie diese lokal oder auch im globalen Zusammenwirken zu den unterschiedlichsten Eigenschaften im Bauteil führen. Dafür sind erweiterte Analysemethoden erforderlich, die Untersuchungen an Kunststoffen und Kunststoffbauteilen auch unter Berücksichtigung geometrischer Einflüsse und prozesstechnischer Randbedingungen zulassen.

Er prägte den Begriff der „Erlanger Schadensanalyse“, die sich auch über sein Leben und Wirken hinaus in einer Buchreihe abbildet, die er begonnen hat, aber selbst nicht mehr abschließen konnte. Die Herausgeber widmen dieses Buch seinem Wirken und seinen Verdiensten um die Kunststofftechnik und der Schadensanalyse an Kunststoffen.





# Inhalt

<b>Gedenkwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Geleitwort</b> .....	<b>XI</b>
<b>Herausgeber und Autor</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Viskosität und Ähnliches</b> .....	<b>1</b>
1.1 Kennwerte .....	2
1.1.1 Dynamische Viskosität $\eta$ .....	4
1.1.2 Kinematische Viskosität $\nu$ .....	4
1.1.3 Relative Viskosität $\eta_{\text{rel}}$ .....	5
1.1.4 Spezifische Viskosität $\eta_s$ .....	5
1.1.5 Weitere rheologische Einheiten, Skalen .....	5
<b>2 Aussagemöglichkeiten und Grenzen der Rheometrie</b> .....	<b>7</b>
2.1 Nullviskosität .....	8
2.1.1 Definition .....	8
2.1.2 Bedeutung der Nullviskosität .....	11
2.1.3 Dehn- vs. Scherviskosität .....	12
2.2 Messungen gemäß DIN und Berechnung der Viskosität .....	14
2.3 Messfehler bei rheologischen Untersuchungen .....	16
<b>3 Viskosität-Messverfahren</b> .....	<b>21</b>
3.1 Kapillarviskosimeter .....	22
3.1.1 Normaldruck Kapillarviskosimeter .....	24
3.1.1.1 Messprinzip .....	24
3.1.1.2 Kennwerte der Viskosität .....	25
3.1.1.2.1 Viskositätszahl – Staudinger-Funktion .....	26
3.1.1.2.2 Grenzviskosität – Staudinger-Index .....	27
3.1.1.2.3 K-Wert nach Fikentscher .....	28

3.1.1.3	Aussagemöglichkeiten und Grenzen der Lösungsviskosität .....	29
3.1.1.4	Versuchsdurchführung .....	30
3.1.1.5	Fehlerquellen .....	31
3.1.2	Hochdruckkapillarrheometer .....	34
3.1.2.1	Messprinzip .....	35
3.1.2.2	Fehlerquellen .....	36
3.1.2.3	Gezielter Gegendruck .....	36
3.1.3	Geschwindigkeitsgeregeltes Kapillarrheometer .....	37
3.1.4	Mehrfach Kapillarrheometer .....	37
3.1.5	Versuchsdurchführung .....	38
3.1.6	Schmelzindex (MVR/MFR bzw. MVI/MFI) .....	39
3.1.6.1	Messprinzip .....	40
3.1.6.2	Versuchsdurchführung .....	41
3.1.6.3	Fehlerquellen .....	43
3.1.7	Korrekturen .....	44
3.1.7.1	Bagley-Korrektur .....	44
3.1.7.2	Cogswell-Korrektur .....	45
3.2	Rotations- und Oszillationsrheometer .....	47
3.2.1	Messprinzip (Couette/Searle) .....	48
3.2.2	Messgeometrie .....	50
3.2.2.1	Zylinder-in-Zylinder-Geometrie .....	51
3.2.2.2	Kegel-Platte-Geometrie .....	52
3.2.2.3	Platte-Platte-Geometrie .....	54
3.2.2.4	Rabinowitsch/Weissenberg Korrektur .....	56
3.2.2.5	Relative Geometrie .....	57
3.2.3	Mechanische Beanspruchung .....	57
3.2.3.1	Stationäre Beanspruchung .....	57
3.2.3.2	Dynamische (oszillatorische) Beanspruchung .....	58
3.2.3.3	Anwendung von Rotations- und Oszillationsmessungen .....	58
3.2.4	Versuchsdurchführung .....	61
3.2.4.1	Trimmen .....	62
3.2.4.2	Temperaturkonstanz .....	64
3.2.4.3	Thixotropie .....	64
3.2.4.4	Fehlerquellen .....	65
3.3	Auslaufbecher .....	66
3.3.1	Messprinzip .....	66
3.3.2	Versuchsdurchführung .....	67
3.3.3	Fallbeispiele .....	68
3.3.4	Auslaufbecher in der Schüttguttechnik .....	70

3.4	Kugelfallviskosimeter .....	72
3.4.1	Messprinzip .....	72
3.4.2	Versuchsdurchführung .....	74
<b>4</b>	<b>Stoffliche und prozesstechnische Einflüsse .....</b>	<b>77</b>
4.1	Schergeschwindigkeit in der Düse .....	77
4.2	Molekulargewicht, Molekulargewichtsverteilung .....	81
4.3	Einfluss Feuchte .....	84
4.4	Einfluss Druck .....	86
4.5	Strömung und Struktur .....	87
<b>5</b>	<b>Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>93</b>
5.1	Kunststoffspezifische Aussagen .....	93
5.1.1	Styrolpolymerisate .....	93
5.1.2	Polykondensate .....	94
5.1.3	Gefüllte Systeme .....	94
5.1.4	Reaktionsharze .....	95
5.1.5	Verarbeitbarkeit .....	96
5.1.6	Topfzeit .....	97
5.1.7	Gelzeit .....	97
5.1.8	Vergleich der Gelzeit-Messverfahren .....	99
5.1.9	Viskositätsabhängigkeit von der Scherrate, gemessen mit und ohne Gegendruck im Hochdruckkapillarrheometer .....	101
5.2	Qualitätssicherung .....	102
5.2.1	Wareneingangskontrolle und Qualitätssicherung .....	103
5.2.2	Abhängigkeit der Viskosität bei Mehrfachverarbeitung im Vergleich zur Neuware .....	106
5.2.3	Granulat .....	107
5.2.4	Alterungsverhalten .....	107
5.3	Schadensanalytik .....	108
5.3.1	Polyamid-Dübel .....	108
5.3.2	Frontscheibe eines Flugzeugs .....	108
5.3.3	Schadensfallbeispiel Polycarbonat .....	110
5.3.4	Lackiertes Bauteil aus ASA/PC .....	111
5.3.5	Extrudierte Polyamid-Profile .....	112
5.3.6	Silikone .....	114

<b>6</b>	<b>Normen</b> .....	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>Verwendete Literatur</b> .....	<b>119</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenanhang</b> .....	<b>121</b>
	<b>Index</b> .....	<b>129</b>

# Geleitwort

Dieses Buch, der achte Band des Kompendiums „ERLANGER Kunststoff-Schadensanalyse“ von Professor G.W. Ehrenstein, trägt den passenden Titel „Viskosität“. Die Viskosität ist nach wie vor die Schlüsseleigenschaft der Rheologie, die 1920 ihren Anfang nahm, als Eugene Bingham und Markus Reimer das Wort Rheologie prägten, und im selben Jahr Hermann Staudinger der Welt offenbarte, dass Polymere keine Kolloide, sondern Makromoleküle sind. 1920 demonstrierte Staudinger, wie die Viskosität direkt mit dem Molekulargewicht zusammenhängt, und entlarvte damit die Theorien, auf die Wissenschaftler zuvor ihr Verständnis von Polymeren gestützt hatten, als falsch. Heute ist die Viskosität und ihre Abhängigkeit vom Molekulargewicht, der Verformungsgeschwindigkeit, der Temperatur, der Feuchtigkeit und der Alterung immer noch eines der wichtigsten Diagnosewerkzeuge für den praktizierenden Ingenieur und Wissenschaftler. Die Viskosität ist das Bindeglied zwischen dem Molekül und dem Endprodukt. Sie steuert nicht nur, wie das Polymer in ein Endteil umgewandelt wird, sondern trägt auch Informationen über die Molekularstruktur, die die Eigenschaften eines Bauteils beeinflussen. Professor Ehrenstein und seinem Kollegen Dipl.-Ing. L. Gehm ist es gelungen, dies im vorliegenden Band hervorragend zu erläutern.

Der Band beginnt mit der Definition der verschiedenen Begriffe der Viskosität wie Schmelzindex, so wie auch dynamische, kinematische, relative und spezifische Viskosität. Es folgt eine Diskussion der verschiedenen Faktoren, die die Größe der Viskosität beeinflussen, nämlich Schergeschwindigkeit, Feuchtigkeitsgehalt, Druck, Strömung und Molekularstruktur. Nach der Einführung in die Grundlagen stellen die Autoren die verschiedenen Messverfahren vor, die dem Praktiker zur Verfügung stehen, darunter das Kapillarviskosimeter, der Auslaufbecher, das Kugelfallviskosimeter und die verschiedenen Rotationsrheometer. All diese rheometrischen Techniken werden mit dem kompletten Gleichungssatz vorgestellt, der es dem Ingenieur erlaubt, die Messungsergebnisse vollumfänglich hinsichtlich ihres Entstehens zu beurteilen. An dieser Stelle bringen die Autoren dem Leser die verschiedenen Anwendungen von Viskositätsmessungen nahe, wie z.B. bei gefüllten Systemen und Reaktionsharzen. Die Autoren schließen mit der Darstellung verschiedener Fallstudien ab, in denen sie aufzeigen, wie die Viskosität als Werkzeug

zum Verständnis des Versagens verschiedener Komponenten dienen kann – von der Qualitätskontrolle des Materials, das in eine Produktionsanlage gelangt, bis hin zum Versagen eines Flugzeugfensters oder eines ausgefallenen extrudierten Polyamidprofils. Die praktischen Beispiele lehren den Leser nicht nur, wie man die verschiedenen verfügbaren Techniken zur Beurteilung der Vorgänge einsetzt, sondern vermitteln praktische Erfahrung auf diesem Gebiet.

Dieses Buch ist sehr empfehlenswert für jeden Techniker, Ingenieur oder Berater, sowohl für die Arbeit im Feld wie im Labor. Es empfiehlt sich überdies als pädagogisches Hilfsmittel, um Ingenieurstudenten wichtige Diagnosewerkzeuge bei der Untersuchung des Versagens von Kunststoffteilen zu vermitteln.

Chemikern, Physikern und Ingenieuren ermöglichte die Viskosität als wichtige Eigenschaft von Polymerwerkstoffen, deren Struktur und Verarbeitbarkeit zu verstehen und wird deshalb seit Langem als Diagnosewerkzeug zur Fehlersuche bei Versagen von Kunststoffprodukten eingesetzt. Aus diesen Gründen ist dieses Buch sowohl für den Praktiker als auch für den Theoretiker unverzichtbar.

Madison, WI, Januar 2024

*Tim Osswald*

### **Tim Osswald**

Tim Osswald ist Professor für Maschinenbau und Direktor des Polymer Engineering Center an der University of Wisconsin-Madison. Nach seiner Promotion in Maschinenbau an der University of Illinois at Urbana-Champaign auf dem Gebiet der Polymerverarbeitung verbrachte er zweieinhalb Jahre als Alexander-von-Humboldt-Stipendiat am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Aachen, Deutschland. Er erhielt 2001 den VDI-K Dr.-Richard-Escales-Preis. Im Jahr 2006 wurde er zum Ehrenprofessor der Universität Erlangen-Nürnberg in Deutschland und 2011 zum Ehrenprofessor der Nationalen Universität von Kolumbien ernannt. Professor Osswald lehrt die Verarbeitung von Polymeren und Polymerverbundwerkstoffen sowie das Konstruieren mit Polymeren und Polymerverbundwerkstoffen und forscht zudem in diesen Bereichen. Professor Osswald hat über 300 Arbeiten veröffentlicht, die Bücher *Materials Science of Polymers for Engineers* (1996, 2003, 2012), *Polymer Processing Fundamentals* (1998), *Injection Molding Handbook* (2001, 2007), *Compression Molding* (2003), *Polymer Processing Modeling and Simulation* (2006), *International Plastics Handbook* (2006, 2019), *Saechtling Kunststoff Taschenbuch* (2007, 2013, 2022), *Plastics Testing and Characterization* (2008), *Understanding Polymer Processing* (2010, 2017), *Polymer Rheology* (2015) und *Discontinuous Fiber Composites* (2020) (alle beim Hanser Verlag erschienen). Seine Bücher wurden ins Italienische, Deutsche, Spanische, Japanische, Chinesische, Koreanische, Farsi und Russische übersetzt. Professor Osswald ist auch der Reihen-

herausgeber von *Plastics Pocket Power* (Hanser 2001), das derzeit 6 Bücher umfasst, ist der Herausgeber für *Polymer Composites*, Herausgeber des amerikanischen *Journal of Polymer Engineering* und der englischsprachige Herausgeber des *Journal of Plastics Technology*. Professor Osswald ist zudem im wissenschaftlichen Beirat mehrerer Industrien tätig, ist einer der Mitbegründer der Madison Group und gehört einer Kommission zur Schaffung eines Wissenschaftsministeriums in Kolumbien an.