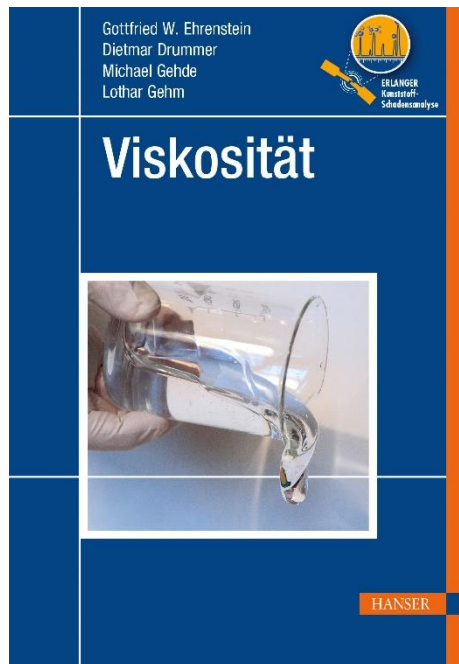


HANSER



Leseprobe

zu

Viskosität

von Gottfried W. Ehrenstein, Dietmar Drummer,
Michael Gehde und Lothar Gehm

Print-ISBN: 978-3-446-47272-3
E-Book-ISBN: 978-3-446-47290-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472723>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

Gedankwort	V
Geleitwort	XI
Herausgeber und Autor	XV
1 Viskosität und Ähnliches	1
1.1 Kennwerte	2
1.1.1 Dynamische Viskosität η	4
1.1.2 Kinematische Viskosität ν	4
1.1.3 Relative Viskosität η_{rel}	5
1.1.4 Spezifische Viskosität η_s	5
1.1.5 Weitere rheologische Einheiten, Skalen	5
2 Aussagemöglichkeiten und Grenzen der Rheometrie	7
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
3 Viskosität-Messverfahren	21
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
4	Stoffliche und prozesstechnische Einflüsse	77
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
5	Anwendungsbeispiele	93
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

6	Normen	115
7	Verwendete Literatur	119
8	Tabellenanhang	121
	Index	129

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.

Herausgeber und Autor



(Quelle: LKT Erlangen)

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Gottfried Wilhelm Ehrenstein †

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Gottfried Wilhelm Ehrenstein (1937 – 2021) wurde in Danzig geboren und studierte nach einem humanistischen Abitur an der Technischen Hochschule Hannover Allgemeinen Maschinenbau. 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 Werkstoff-

kunde/Kunststoffe der Universität-Gesamthochschule Kassel. Nach Ruf 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.

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 war zudem vereidigter Sachverständiger der IHK Nürnberg für Kunststoffe und Sonderwerkstoffe auf Kunststoffbasis und des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin.

Er war 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 Vater von drei Söhnen.



Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer wurde 1971 in Forchheim/Ofr. geboren und hat nach einem mathematisch-naturwissenschaftlichen Abitur Fertigungstechnik in Erlangen studiert. Nach der Promotion (Prof. Ehrenstein) arbeitete er 6 Jahre bei der OECHSLER AG als Leiter Technologie-Management und war gleichzeitig Lehrbeauftragter an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Seit 2009 leitet er den Lehrstuhl für Kunststofftechnik der FAU und zudem am Standort Fürth das Bayerische Polymerinstitut (BPI)

und das Geschäftsfeld Kunststoffe der Neue Materialien Fürth GmbH (NMF).

Seit 2011 hat er eine Gastprofessur an der East China University in Shanghai, seit 2013 zudem an Central South University in Changsha, China. Prof. Drummer ist seit 2016 im Beirat „Material“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung sowie als Sachverständiger und Gutachter für Industrie, Gerichte sowie das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) tätig.

Er ist Mitglied der wissenschaftlichen Arbeitskreise Kunststofftechnik (WAK) und Werkstofftechnik (WAW) sowie langjähriger Herausgeber der Zeitschrift Kunststofftechnik im Rahmen von kunststoffe.de mit Unterstützung des Carl Hanser Verlages.



Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde †

Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde studierte an der Universität in Gh-Kassel Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Kunststoffwerkstofftechnik und Konstruktion. Nach seiner Promotion 1993 zum Schweißen von Kunststoffen wechselte er 1994 als Technischer Leiter zur Wegener GmbH, wo er von 1997 bis 2004 die Geschäftsführung Technik innehatte und Gesellschafter wurde. 2004 gründete er die „Ingenieurtechnik Gehde“.

2005 erhielt er den Ruf auf die W3-Professur Kunststoffe der Technischen Universität Chemnitz. Er übernahm dort bis zu seiner Pensionierung die Leitung des Lehrstuhls Kunststoffe. Zudem war er langjährig Direktor des Instituts für Fördertechnik und Kunststoffe der TU Chemnitz. Michael Gehde war Mitglied zahlreicher Wissenschaftsvereinigungen und Verbände.

Die Forschungsarbeiten von Michael Gehde waren von dem ganzheitlichen Ansatz der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehung in der Kunststofftechnik geprägt. In

intensiver Zusammenarbeit mit der Industrie betrieb er die Umsetzung der Erkenntnisse der Forschung in Werkstoff- Prozess- und Konstruktionsinnovationen.



Lothar Gehm

Lothar Gehm studierte Meteorologie und Physik in Mainz. Sein besonderes Interesse fand immer die Anwendung der theoretischen Modelle in die Praxis. So absolvierte er weiterhin ein Studium der Ingenieurwissenschaft, Spezialgebiet Mess- und Regelungstechnik. Er arbeitete bei verschiedenen Firmen in Großbritannien, Frankreich und der Schweiz, bevor er ab 1984 die Sparte Mess- und Medizintechnik der Contraves AG in Zürich leitete. 1992 gründete er dann die Firma proRheo GmbH, die rheologische Messgeräte entwickelt und herstellt.

Außer den standardmäßigen Messgeräten beschäftigte sich Lothar Gehm besonders mit der Entwicklung hochempfindlicher Messgeräte für dünnflüssige Flüssigkeiten (insbesondere für medizinische Anwendungen) wie auch mit der Viskositätsmessung durch Rotationsrheometer direkt im Fertigungsprozess.

Lothar Gehm ist seit 1994 öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Rheologie. Er hat sich in dieser Funktion mit verschiedensten Anwendungen der Rheologie beschäftigt, z. B. bei Schadensfällen, Patentanmeldungen oder -streitigkeiten. Außerdem berät er in dieser Funktion Firmen bei der Entwicklung, Verarbeitung und Herstellung von fließenden Stoffen jeglicher Art.

1

Viskosität und Ähnliches

Die Viskosität ist ein Maß für die Fließfähigkeit einer Substanz. Diese wird von einer Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt. In der Kunststoffverarbeitung werden fast alle Thermoplaste über die schmelzflüssige Phase verarbeitet, ergeben aber ein Produkt im festen Zustand. Die Übergänge von fest in flüssig und umgekehrt sind wenig genau festgelegt, bei kristallinen Strukturen zumindest direkt durch das Schmelzen der kristallinen Bereiche erfassbar, bei amorphen dagegen ist er bislang nicht definiert messbar. Die Bedeutung für die maschinelle Verarbeitbarkeit ist sowohl wissenschaftlich wie auch praktisch noch nicht erfasst.

Duroplaste werden ebenfalls über die flüssige Phase verarbeitet. Reaktive Harzsysteme können in flüssiger oder in fester Form vorliegen, aus der sie durch Erhitzen geschmolzen werden müssen. Das Fließverhalten der reaktionsfähigen Harzansätze nach dem Mischen aller vielfältigen Komponenten gibt Aufschluss über die Füllvorgänge im Werkzeug. Im weiteren Verarbeitungsprozess gibt es Einflüsse auf die Viskosität durch die Werkzeugtemperaturen und die chemischen Reaktionen mit komplexen Überlagerungen durch die wirkenden Drücke und Fließformen.

Die Fließfähigkeit eines Kunststoffs wird als Widerstand der Probe unter Scherung oder Dehnung verstanden und dementsprechend als Scher- bzw. Dehnviskosität bezeichnet.

Eine Besonderheit der Kunststoffe liegt darin, dass

- die meisten Kunststoffe über die schmelzflüssige/flüssige Phase verarbeitet werden; bei teilkristallinen Thermoplasten ist im Gegensatz zu amorphen eine Schmelztemperatur definiert;
- Kunststoffe viskos-elastisch relaxierendes Verhalten zeigen und dadurch die Fließantwort des Kunststoffs bei Scherung oder Dehnung zeitabhängig ist;
- die Fließfähigkeit eines Kunststoffs direkt mit dessen physikalischen und chemischen Zustand korreliert
- Kunststoffe zur Identifizierung in Flüssigkeiten gelöst werden können; das Fließverhalten der Lösung kann Aufschluss über molekulare Zustände liefern
- Kunststoffe makromolekulare Werkstoffe mit kettenförmiger Struktur und physikalischen mit 500-fach festeren chemischen Bindungen ausgestattet sind.

- Die Fließfähigkeit des Kunststoffes ist damit nicht nur für die Verarbeitung relevant, auch in der Bauteil- und Schadensanalyse wird die Fließfähigkeit des Kunststoffes bestimmt. Hier gilt es, Rückschlüsse auf den molekularen Zustand und dadurch bedingte Bauteileigenschaften zu erhalten.

■ 1.1 Kennwerte

Es gibt weit über 100 Begriffe, die sich mit der Viskosität befassen. Die wesentlichen sind in der DIN-Reihe der DIN EN ISO 3219 genormt. Eine Viskositätsangabe, d.h. ein Viskositätswert, ist der Quotient aus zwei Messwerten und somit das Ergebnis einer Berechnung und weiterhin abhängig von der Messart. Je nach verwendeter Methode der Bestimmung wird somit als ein methodenabhängiger Messwert berechnet und angegeben.

Mit der Viskosität η kennzeichnet man einen Punkt des Fließverhaltens z.B. der nicht vernetzenden Thermoplast- und Elastomer-Schmelze, aber auch der duroplastischen und elastomeren chemischen sich verfestigenden Formmassen während der Verarbeitung, wobei die Art und Form der Strömung auf deren Gleichmäßigkeit und Konstanz einen großen Einfluss haben.

Der hohen Bedeutung in der Verarbeitung folgend, wird überwiegend die Viskosität als Widerstand des Fluids unter Scherung verstanden und als Scherviskosität bezeichnet, Volumenverformungen als Volumenviskosität bzw. Dehnverformungen als Dehnviskosität. Als kinematische Viskosität ν bezeichnet man den Quotienten aus der dynamischen Viskosität η des Mediums und seiner Dichte ρ . Die dynamische Viskosität η ist das Verhältnis von Schubspannung τ und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ und somit ein Maß für die Zähigkeit eines Fluids. Sie beschreibt das Verformungsverhalten eines Fluids bei mechanischer Belastung oder Verformung. Die dynamische Viskosität η [Pa·s] und die kinematische Viskosität ν [m²/s] stehen über die Dichte ρ [kg/m³] in direktem Zusammenhang:

$$\eta = \nu \cdot \rho$$

Mit dem Begriff Viskosität soll das Fließverhalten einer Probe beschrieben werden. Hierbei wird im Labor unter definierten Laborbedingungen eine Probe definiert belastet. Sie wird insbesondere geschert und/oder gedehnt, teils auch gestaucht. Die hierbei wirkenden Kräfte können – bei Verwendung von genormten Messgeometrien – exakt bestimmt werden. Bei der Verarbeitung hingegen treten zusätzlich unterschiedlichste Rand- und Umgebungsbedingungen wie z.B. Wandgleiten oder Inhomogenitäten und Temperaturgradienten auf. Somit sollte in diesem Zusammenhang von Konsistenz der Probe gesprochen werden.

Um das vollständige Fließverhalten einer Probe in ihrer Applikation beschreiben zu können, sind mehrere unterschiedliche Versuchsdurchführungen notwendig. Mit nur einem rheologischen Messpunkt im Labor lässt sich ein Kunststoff für seine Verarbeitung nicht vollständig beschreiben. Die Aufzeichnung mehrerer Messpunkte des Fließverhaltens bei unterschiedlichen Strömungen bezeichnet man als Fließkurve.

Fließkurven bei Scherbelastung beschreiben den Zusammenhang der Scherviskosität η in Pa·s mit der auf den Thermoplasten wirkenden Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ in 1/s, und der sich daraus einstellenden Schubspannung τ in Pa.



Um das rheologische Verhalten von Thermoplasten vergleichend beschreiben zu können, ist die Aufnahme und Interpretation der Fließkurven unbedingt nötig.

Nahezu alle Thermoplaste, aber auch nicht gehärtete duroplastische Reaktions- und Kondensationsharze und Elastomere werden im schmelzflüssigen Zustand verarbeitet. Der schmelzförmige Zustand wird bei Thermoplasten durch äußere und innere Erwärmung – bei Duroplasten und Elastomeren im nicht polymerisierten Zustand – ggf. auch durch Aufschmelzen erreicht. Starken Einfluss auf das Aufschmelzen hat der Druck, ein weiterer Einfluss auf die Viskosität ergibt sich durch seine Feuchte. Zu Letzterem ist wenig bekannt. Eine Temperatur, die für amorphe Thermoplaste den Übergang vom gummielastischen in den fließfähigen Zustand kennzeichnet, ist bislang nicht definiert.



Die Kenntnisse des viskosen Verhaltens von Kunststoffschmelzen im Hinblick auf die praktische Anwendung sind noch geringer als z. B. die Kenntnisse der mechanischen Eigenschaften fertiger fester Kunststoffe.

Die Rheometrie beschreibt die Messmethoden zur Messung der Fließeigenschaften. Sie zielt auf unterschiedliche definierte Belastungen auf den Kunststoff unter definierten Randbedingungen und der messtechnischen Erfassung der Werkstoffantwort. Meist wird entweder eine Kraft oder ein Druck appliziert und die Fließverformung des Kunststoffs gemessen, teils erfolgt die Versuchsdurchführung auch umgekehrt.

Dem Ziel definierter, konstanter Randbedingungen bei der Messung stehen werkstoffliche Veränderungen (z. B. molekularer Abbau, Vernetzung) und die Änderung physikalischer Randbedingungen (ggf. Temperaturänderung durch Friktion) entgegen und setzen Grenzen in den Prüfparametern.

1.1.1 Dynamische Viskosität η

Die dynamische Viskosität η wird dann als Newtonsche Viskosität verstanden, wenn das Verhältnis von Schubspannung (τ) zu Geschwindigkeitsgefälle oder Schergeschwindigkeit ($\dot{\gamma}$) konstant ist. Kunststoffschmelzen oder -lösungen sind im Allgemeinen Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten, d. h. dass sich der Viskositätswert mit der Schergeschwindigkeit ändert.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

In älterer Literatur wird noch die alte nicht-SI-Einheit Centipoise cP ($1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 10 \text{ g}/\text{cm} \cdot \text{s} = 10 \text{ P (Poise)} = 1000 \text{ cP}$) verwendet.

1.1.2 Kinematische Viskosität ν

Die kinematische Viskosität ν ist das Verhältnis der dynamischen Viskosität η zur ihrer Dichte ρ . Sie gilt nur für Newtonsche Flüssigkeiten. Die Messwerte sind nur vergleichbar bei gleichen Schergeschwindigkeiten.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Dichtebezogene Effekte auf die Viskosität können mit der Bestimmung der kinematischen Viskosität gezielt herausgearbeitet werden.



Um strukturelle/molekulare Veränderungen eines Thermoplasten beschreiben zu können, ist die vergleichende Messung unter gleichen Randbedingungen unbedingt nötig.

Mit der Viskosität kennzeichnet man das Fließverhalten der Thermoplast-Schmelze, aber auch der duroplastischen und elastomeren, chemisch sich verfestigenden Schmelzen während der Verarbeitung, wobei die Art und Form der Strömung auf deren Gleichmäßigkeit und Konstanz einen großen Einfluss haben können.

1.1.3 Relative Viskosität η_{rel}

Das dimensionslose Verhältnis der Viskosität einer Polymerlösung bei einer bestimmten Konzentration (η) und der Viskosität des reinen Lösungsmittels (η_0) bei gleicher Temperatur wird als relative Viskosität (η_{rel}) bezeichnet.

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0}$$

Es wird unterschieden in:

- mit Relativsystem gemessene Viskosität, d.h. keine Absolutviskosität in Pa·s, Angabe oft in Skalenteilen oder Prozent
- Quotient aus der Viskosität der untersuchten Lösung und der Viskosität des reinen Lösemittels siehe auch DIN 1342

1.1.4 Spezifische Viskosität η_s

Die spezifische Viskosität beschreibt die Zunahme der relativen Viskosität mit der Konzentration des Kunststoffes in der Lösung.

$$\eta_s = \frac{\eta_r - \eta_0}{\eta_0}$$

Sie ist weiterhin proportional zu deren Molmasse der Lösung oder des Kunststoffes.

1.1.5 Weitere rheologische Einheiten, Skalen

Regional spezifisch und auch historisch bedingt sind in der Literatur teils noch weitere Kennwerte der Viskosität zu finden, Tabelle 1.1.

Tabelle 1.1 Vergleich unterschiedlicher Skalen

[°E]	Engler-Grade (Deutschland)
[S''] oder [SSU]	Saybolt Universal Sekunde (USA)
[SSF]	Saybolt Furol Sekunde (USA)
[R'']	Redwood Standard (No. 1) Sekunde (Großbritannien)
[RA]	Redwood Admiralty Sekunde (Großbritannien)
[B]	Barbey cm ³ /h (Frankreich)

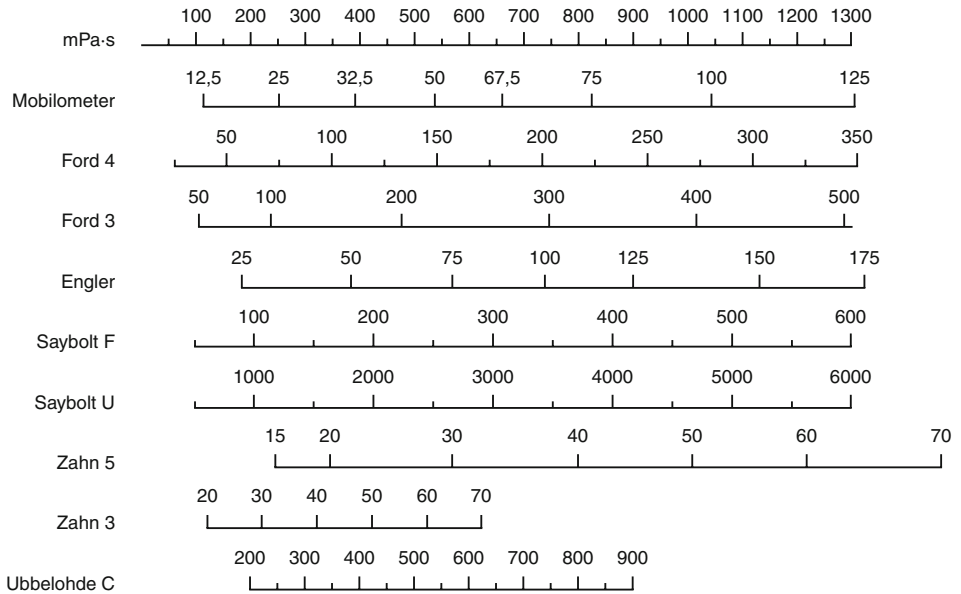


Bild 1.1 Unterschiedliche rheologische Skalen

Index

A

ABS 93
ABS/PA 93
ABS/PC 93
Additivgehalt 22
Alterung 107
amorpher Thermoplaste 11
Anlieferung 105
Anlieferungszustand 105
Anmischen 100
ASA 93, 111
ASA/PC 111
Ausbesserungsarbeiten 108
Ausflussgeschwindigkeit 71
Auslaufkanal 69
Auslaufbecher 17, 66
Auslaufmassenstrom 71
Auslaufzeit 66
Auswertung 58

B

Bagley-Korrektur 35, 44
Bauform 68
Befüllungsfehler 55
Belastungsgeschwindigkeit 13
Benetzungsfähigkeit 114
Berechnungsformel 61
Bewertung der Messergebnisse 21
Bingham Fluide 54
Blasformen 78
Blendmorphologie 89
Bostwick-Viskosimeter 17

C

Campus 77
Casson 54
Chemikalienresistenz 7
Cogswell-Korrektur 45
Copolymerisate 89
Couette 48
CR-Rheometer 47
CS-Rheometer 47

D

Dehnströmung 88
Dehnung 12
Dehnavisiosität 46, 78
Depolymerisation 85
Dietzel & Drückner 52
dominierende Scherströmung 88
Doppelkapillarrheometer 45
Druck 86
Druckabfall 35
Druckabhängigkeit 86
Druckaufnehmer 36
Drücke 77
Durchlaufzeit 32
Durchströmbarkeit 71
Duroplaste 1
duroplastische Systeme 95
dynamische Beanspruchung 58, 60
dynamische Viskosität 2, 4

E

Eigenverstärkung 88
Einflussgrößen 22
Einlaufkante 69

Einlaufstrecke 74
 Einwegmessgeometrien 96
 elastischen Eigenschaften 78
 Elastomere 3
 Entnahmestellen 8
 erstarrte Randschicht 88
 Extrapolationsfehler 10
 Extrusion 77
 Extrusionsblasformen 12
 Extrusionsdruck 42

F

Faserlängen 88
 fehlerhafte Charge 59
 Fehlerquellen 31, 65
 Feuchte 70, 77, 84
 Fikentscher-Gleichung 29
 Fisher-Johns-Methode 98
 Fließfähigkeit 1
 Fließfeldkoeffizient 15
 Fließfront 12
 Fließgesetz 52
 Fließkurven 3
 Fließratenverhältnis 40
 Fließvorgang 10
 flow rate ratio 40
 freies Auslaufen 69
 freies Volumen 85
 Fremdkörper 70
 Fremdüberdruck 23
 Frontscheibe 108
 Füllstoffe 22

G

gefüllte Proben 55
 gefüllte Systeme 94
 gefüllte Werkstoffsysteme 54
 Gegendruck-Hochdruckkapillarrheometer 36
 Gelpunkt 95
 Gelpunktsbestimmung 99
 Geltimermessungen 101
 Gelzeit 96f., 99f.
 Geometriefehler 55
 Gerätekonstante 74
 Geschwindigkeitsgefälle 50
 Geschwindigkeitsgradient 88
 Geschwindigkeitsprofil 87

glasfaserverstärkten Thermoplasten 105
 Glaskapillare 24
 Glasübergang 86
 Glasübergangsbereich 101
 Glasübergangstemperatur 86
 Gleichgewicht 61
 Gleit-Haft-Bewegungen 44
 Granulat 107
 Grenzflächenkräfte 52
 Grenzviskosität $[\eta]$ 27f.
 Gut-Charge 59

H

Hagen-Poiseuille 23
 Hagen-Poiseuille-Gesetz 32
 Herschel-Bulkley 54
 Hochdruckkapillarrheometer 34f., 37, 101
 hydrolysierbare Gruppen 85

I

Identifizierung der Kunststoffe 103
 inhärente Viskosität 27
 innere Gleitmittel 93
 In-Process-Messungen 67
 intrinsische Viskosität 27

K

Kapillarviskosimeter 14, 17, 22
 Kautschukanteil 112
 Kegel-Platte-Geometrie 52
 Kegel-Platte-Messsysteme 15
 Kettenspaltungsreaktionen 85
 Kettenverzweigung 78
 kinematische Viskosität 2, 4
 kleine Schergeschwindigkeit 106
 kohäsive Schüttgüter 71
 Kolbengeschwindigkeit 35
 komplexe Viskosität 48
 Kondensationsharze 3
 konstanter Massedruck 24
 konstanter Prüfkolbengeschwindigkeit 24
 Korngröße 70
 Kornverteilung 70
 Kreiskapillare 24, 35
 Kristallbildung 88
 Kugelfallviskosimeter 14, 17, 72

Kugelkalotte 32
Kuhn-Mark-Houwink-Sakurada-Gleichung
28, 84
K-Wert 28
K-Wert-Erniedrigung 105
K-Wert nach Fikentscher 28

L

lackierte Heizkörperhalter 111
Laminarität 57
Leckstrom 78
linear-viskoelastischen Deformationsbereich 55
Log. Viskositätszahl 27
Lösemittel 32
Lösemittelbestandteil 111
Lösemittelfallen 61
Lösen eines Kunststoffes 32
Lösungskonzentration 32
Lösungviskosität 29, 109
Lufteinschlüsse 44

M

Makromolekül 81
Mark-Houwink-Gleichung 28
Massenmittelwert 83
Materialabbau
– starker (VZ) 113
Mehrfach-Kapillarviskosimetern 37
Mehrfachverarbeitung 103f.
melt flow index 39
melt flow rate 39
Melt-Rheometer 39
Messart 2
Messbereich des Messgeräts 58
Messgeometrien 50
Messgeräte 21
Messmarken 24
Messspalt 55
Messsystemgeometrien 52
Messverfahren 21
Messzeiten 43
methodenabhängiger Messwert 2
MFR 18, 124
MFR-Prüfgerät 35
Mindestmolekulargewicht 7
mittlere Molekulargewicht 83
mittlere Molekülmasse 83

Molekulargewicht 7, 28, 78, 81f.
Molekulargewichtsverteilung 7, 78, 81, 83
Molekülkettenlänge 22
Molekülmassenverteilung 22
Molmasse 5
Molmassenmittel 84
Molmassenverteilung 105
Monomerlösungen 51
Mooney & Ewart 52
MVR 18, 43, 124

N

Neuteil 110
Newtonsche Flüssigkeit 59
Newtonsches Plateau 60
Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten 59
Nicht-Newtonsche Proben 62
niedrigeres Molekulargewicht 111
Normaldruck-Kapillarviskosimetern 24
Normalspannungskräfte 52
Nulldüse 45f., 101
Nullviskosität 8, 10f.

O

Oberflächenbeschaffenheit 70f.
Oberflächenspannung 114
Orientierungsmaximum 88
Ostwald-deWale 54
oszillations Rheometer 47
Oszillationsrheometer 18
oszillatorische Beanspruchung 58
Owens-Wendt-Methode 114

P

PA 105
PA-6 123
PA-66 123
PA-69 123
PA-610 123
Paraffinwaxse 93
PBTP 105
PE 105
PE-HD 82
PE-LD 82
Penetrometer 18
PETP 105

Platte-Platte-Geometrie 54
 Platte-Platte-Messgeometrien 62
 Platte-Platte-Messsysteme 15
 Polyamid-Dübel 108
 Polycarbonat 110
 Polyesterharze 96
 Polykondensate 94
 Polymerisationsgrad 29, 39, 83
 Polymerschmelze 9
 Prinzip der zwei Scherflächen 47
 Produktionskontrolle 26
 Prüfverfahren 21
 PS 93

Q

Qualitätssicherung 103

R

Rabinowitsch/Weissenberg Korrektur 56
 Randbedingungen 21
 reaktionsfähige Harzansätze 1
 Reaktionsharze 95
 Reaktionswärme 95
 Recyclingmaterial 113
 Reinigungsspray 110
 Relativ-Messsystemen 57
 repräsentative Messwerte 52
 Reproduzierbarkeit 19
 Restmonomergehalt 44
 rheologische Einheiten 5
 rheologische Stoffdaten 77
 Rheometrie 3
 Rieselfähigkeit 70
 Roscoe 52
 Rotationskörper 50
 Rotationsrheometer 18f., 47
 Rotationsversuch 59
 Rotationsviskosimeter 15, 85
 Runddüse 42

S

SAN 93
 Sauberkeit der Prüfeinrichtung 43
 Schadensteile 107
 schadhafte Materialcharge 111
 Schadteil 110

Schergeschwindigkeit 47, 54, 106
 schergeschwindigkeitsgesteuertes Rheometer 47
 Scherströmung 14, 51
 Scherung 12, 48, 61
 Scherviskosität 2
 Schlitzkapillare 24, 35
 Schmelzeaustritt 36
 Schmelzebruch 44
 Schmelzeshomogenität 40
 Schmelzestrang 44
 Schmelzetemperatur 85
 Schmelzeviskosität 7, 29, 84, 110
 Schmelzezustand 87
 Schmelzindex 18, 39, 41
 Schmelzindexbestimmung 94
 Schmelzindexmessungen 94
 Schmelzpunkt 113
 Schmelztemperatur 1
 Schneckenkanal 77
 Schubmodul G 48
 Schubspannung 47, 57, 61
 schubspannungsgesteuertes Rheometer 47
 Schüttguttechnik 70
 Schutzgasatmosphäre 32
 Schwingungsrheometer 18
 Searle 48
 Sekundärware 113
 Shish-Kebab-Struktur 88
 Silikone 114
 Silikonöle 114
 Silikonkautschuk 114
 Sollmaterial PA 6/6T 112
 Spannungsrissempfindlichkeit 111
 Spannversuch 9
 Speichermodul G' 48
 Spezifikationen 22
 spezifische Viskosität 5, 26
 Spritzguss 77
 Standardmessgeometrie 47
 stationäre Beanspruchung 57, 59
 stationärer Strömungszustand 36
 Stationarität 19
 Staudinger-Funktion 27
 Staudinger-Index 27
 Staudinger-Kuhn-Gleichung 28, 122
 Stick-Slip-Effekte 44
 Stokes'sches Gesetz 73
 Strangaufweitung 42, 78

Strömungsgeschwindigkeit 14
Struktur
– innere 61
Strukturabbau 65
Strukturaufbau 58
Strukturbeeinflussungen 98
Strukturbildung 88
Strukturviskosität 88
Styrolpolymerisaten 93

T

Taylor-Wirbel 49
teilkristallinen Thermoplasten 11
Temperatureinwirkung 98
Temperaturkonstanz 64
Temperierung 44
Temperierzeit 62
Thermoplaste 1, 81, 121
Thermoplast-Schmelze 4
Thermostatisierung 48
thixotropen Proben 62
Thixotropie 64
Topfzeit 95 ff., 99
Topfzeitbestimmungen 99
Transport- und Lagerstabilität 58
Trennmittel 70
Trimmen 62

U

Ubbelohde-Viskosimeter 25
Umesterung 85
Umordnungsprozesse 48
ungefüllte Polymerschmelzen 39
Unterfüllung 62
Unveränderlichkeit der Probe 44
UP-Harze 97
UV-Licht 108
UV-Stabilisierung 110

V

Varianz der Messergebnisse 58
Variation des Düsenverhältnisses 41
Verarbeitbarkeit 7, 96
Verarbeitungsstufen 8
vergleichende Messungen 57
Verlustfaktor $\tan \delta$ 48

Verlustmodul G'' 48
Vernetzung 95
Vernetzungsreaktionen 103
versprödete Dübel 108
Vinylesterharze 96 f.
viskoelastische Proben 54
Viskosität 1 f.
– kinematische 114
– relative 5, 26
– scheinbare 114
Viskositätsangabe 66
Viskositätsentwicklung 99
Viskositätsmittelwert 83
Viskositätstal 95
Viskositätszahl 28, 94, 105, 123
Viskositätszahl J 27
Viskositätszahl VZ 26
Viskosität unter Gegendruck 37
Volumenviskosität 2
Vorbehandlung 21
VZ-Zahl 29

W

Wandhaftung 36, 45
Wandschergeschwindigkeit 24
Wandscherspannung 24
Wandschubspannung 35
Wareneingang 26
Wareneingangskontrolle 103
Wärmeformbeständigkeit 7
Wassergehalt 70
Wechselwirkungen der Probe 54
wirkende Strömung 11

X

Xenotestgerät 107

Z

Zähigkeit 7
Zeitabhängigkeit 11
Zeitfenster 19
zeitunabhängige Viskosität 9
Zersetzungsprodukten 61
Zustand dieser Einlaufkante 70
Zustandsbereiche 77
Zylinder-in-Zylinder-Geometrie 51
Zylinder-in-Zylinder-Messsysteme 15