

22. Jg. 1/2017

Merseburger Beiträge

*zur Geschichte der
chemischen Industrie
Mitteldeutschlands*



SCI

SACHZEUGEN DER CHEMISCHEN INDUSTRIE E.V.



GÖTTFERT



THIS IS RHEOLOGY

www.goettfert.de

Rheologie und Verarbeitungstechnik

INHALT

<i>“Panta rhei – Alles fließt”</i>	3
Axel Göttfert Die Rheologie der Druckströmung – die strategische Leitlinie der GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH von Anbeginn	6
Autorenvorstellung	29
Hans-Joachim Radusch Rheologie – Essentielles Instrument der Polymerwerkstoffentwicklung	30
Autorenvorstellung	51
Zeitzeugen vorgestellt: <i>“Das Zeitalter der Rheometrie eingeläutet”</i> – Prof. h.c. Dr. e.h. Otto GÖTTFERT †	52
Zeitzeugen vorgestellt: International anerkannter Rheologe – Prof. Dr. Ernst-Otto REHER †	56
Zeitzeugen berichten: Das Problemlabor <i>“Technologie der Informationsaufzeichnungsmaterialien (IAM)”</i>	64
Sachzeugen vorgestellt: Die Begießmaschine im Industrie- und Filmmuseum Wolfen	70
Mitteilungen aus dem Verein	77
Quellenverzeichnis Bilder	78

*Wir danken der Firma
GÖTTFERT Werkstoff- und Prüfmaschinen GmbH,
insbesondere Herrn Dr. Axel GÖTTFERT,
für die Unterstützung bei der Herausgabe dieses Heftes.*

*Frau Svetlana REHER danken wir für viele Hinweise
und der Zurverfügungstellung von Dokumenten und Bildern.*

Impressum

Herausgeber:

Förderverein "Sachzeugen der chemischen Industrie e.V." (SCI), Merseburg

c/o Hochschule Merseburg (FH)

Eberhard-Leibnitz-Straße 2

06217 Merseburg

Telefon: (03461) 46 22 63

Telefax : (03461) 46 22 75

Internet www.dchm.de

Redaktionsteam:

Prof. Dr. sc. Klaus Krug

Prof. Dr. habil. Hans Joachim Hörig

Dr. rer. nat. habil. Dieter Schnurpfeil (Federführung)

Gestaltung:

ROESCH WERBUNG Halle (Saale)

www.roesch-werbung-halle.de

Titelfoto: Jochen Ehmke, Merseburg

Industriefotos/Titelseite:

Bildarchiv Industrie- und Filmmuseum Wolfen e.V.

Dow Olefinverbund GmbH/Public Affairs

Martin Thoß, Dr. Wolfgang Späthe, SCI Merseburg

Umschlaginnenseite vorn: GÖTTFERT Werkstoff- und Prüfmaschinen GmbH

Umschlaginnenseite hinten: SCI Merseburg

ISBN 978-3-942703-83-3

Redaktionsschluss:

September 2017

Zum Geleit

“Panta rhei – Alles fließt”

Mit diesem Aphorismus [1] gab HERAKLIT von Ephesos (um 520-460 v. Chr.) den Philosophen um SOKRATES (469-399 v. Chr.) einen entscheidenden Anstoß für die Entwicklung ihrer Philosophien. SOKRATES’ Schüler PLATON (427-347 v. Chr.) formulierte: *“Alles fließt und nichts bleibt, es gibt nur ein ewiges Werden und Wandeln”*. Noch anschaulicher klingt das so: *“Man kann nicht zweimal in denselben Fluss steigen”*. Auch Johann Wolfgang von GOETHE (1749-1832) nahm in einem seiner Gedichte diese philosophische Weisheit auf:

*“Gleich mit jedem Regengusse
Ändert sich dein holdes Tal.
Ach, und in demselben Flusse
Schwimmst du nicht zum zweiten Mal.”* [2]

Die Rheologie (deutsch auch “Fließkunde”) ist die Lehre von den Fließerscheinungen und von den Gesetzmäßigkeiten des Fließens von Flüssigkeiten, kolloiden Systemen und Festkörpern unter der Wirkung äußerer Kräfte [3]. Die Rheologie als die Wissenschaft vom Fließ- und Verformungsverhalten der Materie beschreibt und untersucht die Abhängigkeit dieser Gesetzmäßigkeiten von der physikalischen und chemischen Struktur der fließenden Stoffe [1,3]. Sie umfasst Teilgebiete der Elastizitäts- und Plastizitätstheorie ebenso wie die Strömungslehre. Als typisches interdisziplinäres Fach steht die Rheologie in engem Kontakt mit der Physik, der Physikalischen Chemie sowie den Ingenieur- und Werkstoffwissenschaften. Sie beschäftigt sich sowohl mit kontinuumsmechanischen Problemen als auch mit der Herleitung der dafür notwendigen Materialgesetze [1] und ist nicht weniger kompliziert als der philosophische Grundgedanke des *“Panta rhei – Alles fließt”*.

Während an strömenden idealen Fluiden definitionsgemäß keine Reibungskräfte auftreten, sind in strömenden realen Flüssigkeiten und Gasen Reibungskräfte vorhanden. Das Fluid haftet infolge von Adhäsionskräften an der Rohrwandung. Die Fluidschichten besitzen unterschiedliche Geschwindigkeiten und verschieben sich gegeneinander. Reale Flüssigkeiten und Gase setzen dieser Verschiebung einen Widerstand als Scherkraft entgegen, was man auch allgemein als “innere Reibung” bezeichnet. Nach Isaak NEWTON (1642-1726) sind bei der dynamischen Zähigkeit eine definierte Schubspannung und das Geschwindigkeitsgefälle einander proportional (“NEWTONsche Flüssigkeiten”). Bei Laminarströmungen lässt sich die dynamische Zähigkeit mit üblichen Viskosimetern messen [4].

Viele industrielle Produkte, wie Lösungen hochmolekularer, polymerer Stoffe, und Naturprodukte, wie Blut o.ä., folgen jedoch in ihrem Fließverhalten nicht dem NEWTONschen Reibungsgesetz. Die scheinbare dynamische Zähigkeit oder Plastizität dieser “nicht-NEWTONschen” Flüssigkeiten hängt bei konstanter Temperatur von der auf sie wirkenden Schubspannung ab.

Wir konstatieren: die Rheologie ist offenbar ein schwieriges Gebiet, das sich gar nicht so leicht für einen Laien erschließen lässt. Trotzdem wollen wir in diesem Heft versuchen, die Rheologie und Rheometrie sowie die daraus resultierende Verarbeitungstechnik und uns nahestehende Akteure auf diesen Gebieten dem geneigten Leser etwas näher zu bringen.

Im Hauptbeitrag stellt Dr. Axel GÖTTFERT, Geschäftsführer der GÖTTFERT Werkstoff- und Prüfmaschinen GmbH in Buchen/Odenwald, sein vom Vater übernommenes Unternehmen vor, das als Weltmarktführer auf dem

Gebiet der Rheometrie gilt. Den Gründer des Unternehmens, Otto GÖTTFERT †, der im Juli diesen Jahres 100 Jahre alt geworden wäre, stellen wir als Zeitzeugen vor. Durch die Verbindungen zum Merseburger Hochschullehrer und Rheologen Ernst-Otto REHER † stiftete er der TH Merseburg im Jahre 1991 die Ausrüstung für ein modernes Rheologielaboratorium. Er war dem SCI zugetan und finanzierte 2004 das Heft 24 unserer Schriftenreihe mit dem Titel “50 Jahre Hochschule in Merseburg” sowie den Nachdruck im Jahre 2006 (insgesamt 1200 Exemplare, inzwischen vergriffen).

Der zweite Hauptbeitrag des Merseburger Professors Dr. Hans-Joachim RADUSCH (Emeritus der Universität Halle-Wittenberg) bringt uns die Rheologie als essentielles Instrument der Polymerwerkstoffentwicklung näher. Ausgehend vom “*Panta rhei*” des HERAKLIT erklärt uns der Autor an zahlreichen Beispielen und Bildern anschaulich die theoretische und praktische Bedeutung dieses noch jungen Wissenschaftszweiges.

Beim Lesen der beiden Beiträge von und über die GÖTTFERTs und ihre Unternehmung in Buchen im Odenwald/Baden-Württemberg mag sich mancher fragen: “*Was hat das mit der Geschichte der chemischen Industrie Mitteldeutschlands zu tun?*” Aus der Vorstellung des Zeitzeugen Prof. Dr. Ernst-Otto REHER † wird jedoch ersichtlich, dass die ehemalige Technische Hochschule in Merseburg in ihm einen international anerkannten und hochgeschätzten Rheologen in ihren Reihen hatte, der in den späten 1980er Jahren erste Verbindungen zur Firma GÖTTFERT knüpfte und nach 1993 dort seine im damaligen Leningrad, heute wieder St. Petersburg, und in Merseburg erworbenen reichen Erfahrungen und Kenntnisse auf den Gebieten der Rheologie, Rheometrie und Verarbeitungstechnik als Forschungs- und Ent-

wicklungsleiter einbringen konnte. Danach stand er dem mittelständischen Unternehmen noch bis 2010 beratend zur Seite. Otto GÖTTFERT in den 1990er Jahren zu Ernst-Otto REHER: “*Herr Professor, Sie rechnen sich für die Firma ... Sie sind auf Lebzeiten bei uns angestellt...(wenn Sie wollen)*”[5].

Übrigens ist es ein Bonmot, dass neu hinzugekommene, unerfahrene Jungstudenten annahmen, REHER hätte seine eigene Wissenschaft nach sich selbst “R(h)eologie” genannt.

Die beiden Zeitzeugen Dr. Günter MATTER und Prof. Dr. Reinhard KÄRMER, ehemalige Schüler von REHER, geben uns einen Einblick in die Bemühungen der 1970/80er Jahre, die wissenschaftliche Rheologie im Rahmen des Problemlabors “Technologie der Informationsaufzeichnungsmaterialien (IAM)” für die Wirtschaft (hier konkret die Filmfabrik Wolfen) nutzbar zu machen.

Mit Bezug auf die Filmfabrik Wolfen (siehe auch kleines Industriefoto auf der Titelseite) zeigen wir abschließend unter der Rubrik “Sachzeugen vorgestellt” die im Industrie- und Filmmuseum Wolfen aufbewahrte und ausgestellte historische Begießmaschine aus der Gründungszeit der Filmfabrik Wolfen um 1909. Sie veranschaulicht die praktische Seite von Rheologie. Wir hoffen, dem geneigten Leser wird hier am praktischen Beispiel der Fotoindustrie der Zusammenhang von Rheologie und Verarbeitungstechnik deutlich.

Ernst-Otto REHER trat dem SCI im Juni 2000 als Mitglied bei und nahm als Mitstreiter aktiv an zahlreichen der nunmehr über 200 Kolloquien des Vereins teil. Er trat auch als Autor unserer Schriftenreihe und als Kolloquiumsvortragender in Erscheinung. Am 19.1.2017 war als 214. Kolloquium des SCI sein Vortrag

“Panta rhei – alles fließt – ein kurzer Einblick in die Rheologie” vorgesehen. Es sollte nicht sein – das Leben spielte nicht mit. Womit sich der Kreis schließt: *“Panta rhei.”* ■

Das Redaktionsteam
Prof. Dr. sc. Klaus KRUG
Prof. Dr. habil. Hans Joachim HÖRIG
Dr. rer. nat. habil. Dieter SCHNURPFEL

Literaturverzeichnis

- [1] [www.wikipedia.org/wiki/panta rhei](http://www.wikipedia.org/wiki/panta_rhei) und Rheologie, 15.7.2017
- [2] Johann Wolfgang VON GOETHE: Sämtliche Gedichte, Artemis, Zürich 1950, S.512
- [3] Meyers Neues Lexikon, Band 6, VEB Bibliographisches Institut, Leipzig 1963, S. 945
- [4] Wilhelm R. A. VAUCK, Hermann A. MÜLLER: “Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik”, 5. Aufl., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1978, S. 54
- [5] Ernst-Otto REHER: persönliche Notizen, zur Verfügung gestellt von Svetlana REHER

DIE RHEOLOGIE DER DRUCKSTRÖMUNG – DIE STRATEGISCHE LEITLINIE DER GÖTTFERT WERKSTOFF-PRÜFMASCHINEN GMBH SEIT ANBEGINN

von Axel Göttfert

*Nach einem Vortrag anlässlich des 219. Kolloquiums des SCI am 15.6.2017
an der Hochschule Merseburg*

“Rheologie” – ein Fremdwort

Anfang der 1960iger Jahre zur Zeit der Firmen-
gründung, war der Begriff “Rheologie” zumin-
dest in der Polymerherstellung und -verarbei-
tung noch ein Fremdbegriff. So beschrieben
damals Mitteilungen der AWETA [1], dem zen-
tralen Kunststofflabor der BASF, die rheologi-
sche Charakterisierung von polymeren Werk-
stoffen (in dem Falle des Polystyrols) auf der
Suche nach *“eindeutigen Kennwerten, um
deren Verarbeitbarkeit zu kennzeichnen”*. Den
Begriff “Rheologie” selber nahm man jeden-
falls noch nicht in den Mund. Es war offensicht-
lich, dass die zur Charakterisierung der neu ent-
stehenden Polymere notwendige Messtechnik
noch fehlte.

Dies erkannte mein Vater Otto GÖTTFERT
(siehe “Zeitzeugen vorgestellt”) damals als die
Gelegenheit, sich selbstständig zu machen
(Bild 1). Als technischer Leiter eines namhaften
Herstellers von Zugprüfmaschinen lag es für
ihn nahe, mögliche Analogien dieser schon ein-
geführten Technologie auf die neuen polymere-
nen Werkstoffe anzuwenden. In gleicher Weise
hatten Ende der 1950er Jahre die Amerikaner
MERZ und COLWELL [2] ein erstes Hoch-
druck-Kapillarrheometer beschrieben, welches
als Basis eine umgebaute Zugprüfmaschine
nutzte, um so Stempelkräfte bis 25 kN (Kilo
Newton) zu realisieren (s.u., Seite 17 ff.).
Gemäß der Devise *“Das machen, was die*



Andern nicht machen“, ein Ausspruch den er später oft äußerte, eliminierte mein Vater die entstehenden Stempel/Kanalreibungen, indem er anstelle einer Kraftmessung am Prüfstempel, so wie es bei der Zugprüfmaschine die Vorgabe war, durch die direkte Messung des Schmelzdruckes vor der Düse ersetzte. Mit dem weltweit ersten Kapillarrheometer war damit der Grundstein für eine unternehmerische Zukunft gegeben.

Die bei der klassischen Druckströmung angewendete Messtechnik, welche durch den erzwungenen Volumenstrom durch Kanal und Düse gegeben ist, bildet diese idealtypisch die wichtigsten Herstell- und Verarbeitungsverfahren von Hochpolymeren ab. Im Gegensatz zur Rotationsrheometrie, die konstruktiv bedingt keine Scherbeanspruchungen realisieren kann, welche den diversen Verarbeitungsprozessen nahekommen, konnte die Dominanz der Kapillarrheometer in den folgenden Jahrzehnten deutlich zunehmen.

Bild 1 (Seite links)
Der erste Schritt der Selbstständigkeit von Otto GÖTTFERT im angemieteten Gebäude, der ehemaligen Kettenmühle Buchen/Odenwald, 1962

Die Schmelzindexmessung

Das erste halbautomatische Schmelzindexgerät

Während in der Anfangszeit erst durch die Hochdruckkapillarrheometrie aufgrund der nun möglichen hohen Lasten von bis zu 25 kN, signifikante Informationen über die Verarbeitbarkeit von Polymeren gegeben waren, existierte schon einige Jahre davor die Schmelzindexmessung. In gewisser Weise ist ein einfaches Schmelzindexgerät dem bekannten Ford-Auslaufbecher nachempfunden, welcher Mitte der 1940er Jahre erstmals erwähnt wurde und 1957 in den USA zur Normung kam. Der pro 10 Minuten gemessene Massestrom, der sich unter Gewichtsbeaufschlagung ergibt, bildet dabei die Grundlage für den Schmelzindexwert. Diese einfache Messung verlangt zeitlich definierte Probenahmen und deren Verwiegung.

Nachdem es bald eine gesicherte Erkenntnis gab, dass sich die Dichte von fertiggestellten Kunststoffen in der Regel nicht mehr ändert, verfolgte Otto GÖTTFERT die Entwicklung einer einfachen Automatisierung am Gerät mit Hilfe eines Diagrammschreibers, um so den gemessenen Volumenstrom zu erfassen. Dadurch konnte man, bei bekannter Schmelzendichte, auf die Gewichtsmessung verzichten. Man erhielt dadurch wesentlich mehr Messintervalle im Vergleich zu den manuell gezogenen Probenahmen. Zusätzlich ermöglichte das eine verbesserte statistische Auswertung.

Mit dem ersten Schmelzindexgerät zur halbautomatischen Volumenstrommessung war schon in den frühen 1960iger Jahren auch das zweite Standbein der noch jungen Firma GÖTTFERT geboren, welches auch im aktuellen Portfolio des Unternehmens eine maßgebliche Rolle einnimmt (Bild 2).

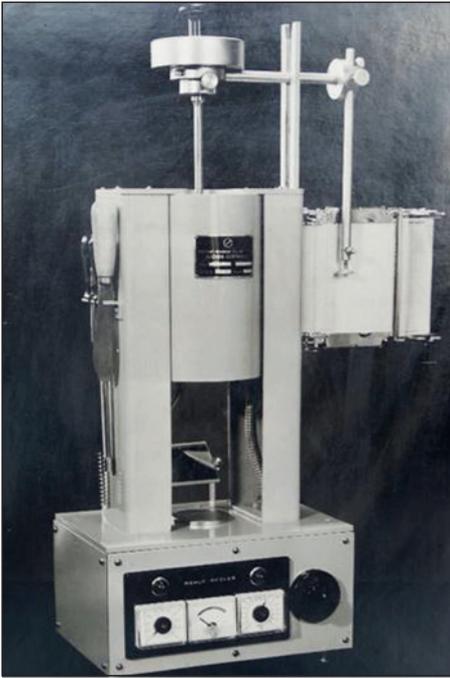
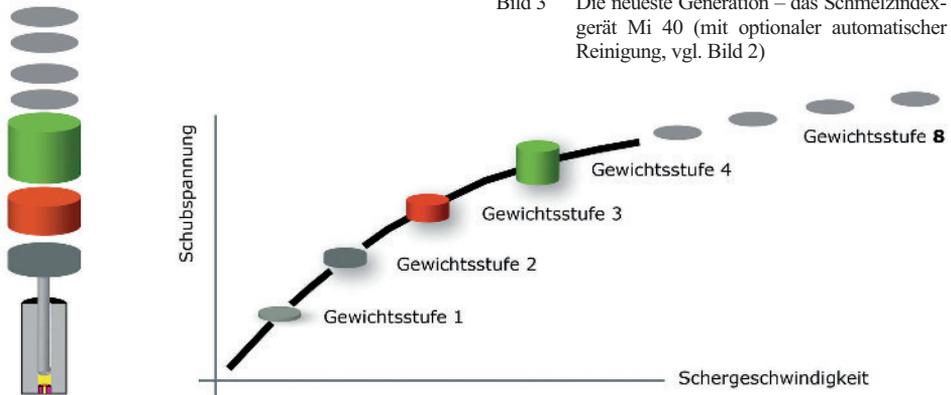


Bild 2 Erstes Schmelzindex-Prüfgerät mit integriertem Diagrammschreiber zur halbautomatischen Volumenstrommessung, 1962

Die jahrzehntelange Entwicklung führte zur neuesten Generation, dem Schmelzindexgerät Mi 40 (Bild 3), das über eine integrierte “Multi-gewichtsauswahl” zur sequenziellen Ermittlung des Schmelzindex bei unterschiedlichen Gewichten innerhalb einer Messreihe verfügt (Grafik 1). Diese Option ermöglicht es, mit einer Kanalfüllung einen erweiterten Fließbereich über die Auswahl unterschiedlicher Prüf-gewichte abzudecken.



Bild 3 Die neueste Generation – das Schmelzindexgerät Mi 40 (mit optionaler automatischer Reinigung, vgl. Bild 2)



Grafik 1 Das Multi-Gewichts-Diagramm des Schmelzindexgerätes Mi 40

Der Schmelzindex als Kriechversuch, neu interpretiert

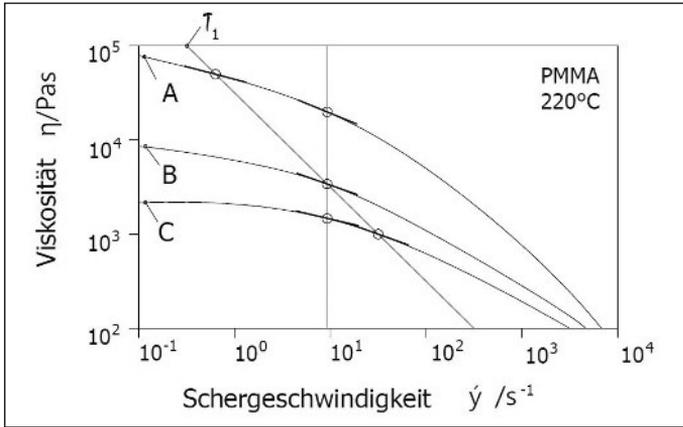
Der Schmelzindex ist mit Abstand die am weitesten verbreitete Prüfmethode, um das Fließverhalten von Kunststoffschmelzen zu erfassen. Die Gründe dafür sind schnell genannt:

- Einerseits ist die angebotene Gerätetechnik, zumindest für manuelle Messung, sehr preiswert. In gleicher Weise gehört das Prüfverfahren eher zu den einfachen Labortätigkeiten, da die Ermittlung des Schmelzindex im Grunde eine "Einpunktmessung" darstellt, welche nur einen diskreten Wert aus dem Spannungs-Deformationsspektrum eines Polymers herausgreift. Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge sind der Aussagefähigkeit des Schmelzindex besonders hinsichtlich des Verarbeitungsverhaltens von Polymerschmelzen Grenzen gesetzt. Die Scherung und die sich damit ergebenden Schergeschwindigkeiten beim Durchströmen der Schmelzindexdüse sind nur ein Bruchteil davon, was beim Herstellungs- und Verarbeitungsprozess erzielt wird.
- Betrachtet man jedoch den Versuchsaufbau ganz grundsätzlich und reduziert diesen nicht nur als eine simple Einpunktmessung, so erkennt man darin den klassischen Kriechversuch (der Kriechversuch dient zur Ermittlung der plastischen zeitabhängigen Verformung einer Probe bei erhöhter Temperatur). Durch die Auflage des Prüfgewichts stellt sich ein stationäres Fließen ein, wobei der Schubspannungsverlauf in Abhängigkeit des sich einstellenden Druckabfalls über der Düse die konstante unabhängige Größe darstellt.

Im Gegensatz dazu ist der sogenannte "Stressing-Test" zu sehen, wobei hier umgekehrt zum Kriechversuch der Volumenstrom konstant gehalten wird und der sich daraufhin einstellende Druckabfall die abhängige Größe darstellt. Experimentell erreicht man dies, indem die Extrusionsgeschwindigkeit konstant gehalten wird. Doch Einpunktmessung ist nicht gleich Einpunktmessung! Will man nun die Wertigkeit des Kriechversuchs bestimmen, welcher der Schmelzindexmessung zugrunde liegt, ist es sinnvoll, beide Versuchsführungen anhand eines Messvergleichs zu analysieren.

Grafik 2 zeigt die Viskositätskurven dreier Polymethylmethacrylat (PMMA)-Typen, die sich in erster Linie durch ihre mittlere Molmasse unterscheiden. Diese Annahme ist dadurch belegt, dass alle drei rheologisch ähnlich erscheinen, denn sie würden sich entlang einer gedachten -45° Linie auf eine Masterkurve verschieben lassen. Besagte Gerade entspricht bei Auftragung der Viskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit gewissermaßen der "Isobaren", d.h. die Schnittpunkte dieser Gerade mit den jeweiligen Viskositätsfunktionen entsprechen immer einer identischen Schubspannung, welche konstant ist. Für diese PMMA-Chargen lag die konstant gehaltene Schubspannung, als Folge des gegebenen Prüfgewichts von 50 N bei $4,5 \times 10^4$. Die sich daraufhin einstellenden Volumenströme, hier charakterisiert durch die korrespondierenden Schergeschwindigkeiten, erzielten eine Variationsbreite von $1-43 \text{ sec}^{-1}$. Alternativ dazu führte der Stressing-Test mit konstantem Volumenstrom bei $8,75 \text{ sec}^{-1}$ zu gemessenen Drücken von 14-81 bar.

Hinsichtlich der Differenzierbarkeit zeigt hier der Kriechversuch eindeutige Vorteile, da dessen Variationsbreite der erreichten Schergeschwindigkeiten bei 1:43 lag, wohingegen die für den Stressing-Versuch äquivalenten Druckwerte nur eine Breite von 1:7,8 aufzeigten.



Grafik 2
Viskositätskurven dreier Polymethylmethacrylat (PMMA)-Typen in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$

Damit besticht der Kriechtest mit einer in diesem Fall 5-fach besseren Differenzierbarkeit (Tabelle 1).

	konstanter Volumenstrom $r_{pm}^{const.} = 2,5 \text{ min}^{-1} = 8,75 \text{ sec}^{-1}$	konstante Schubspannung $\tau^{const.} = 4,55 \times 10^{-4} \text{ Pa} = 5 \text{ kp}$
	Δp	$\dot{\gamma}$
A	81,3	1,00
B	27,3	8,75
C	10,4	43,3
A:C	1 : 7,8	1 : 43

Legende:
 r_{pm} Volumenstrom τ Schubspannung Pa Pascal
 kp Kilopond Δp Druckdifferenz $\dot{\gamma}$ Schergeschwindigkeit

Tabelle 1
Vergleich der gemessenen Druckabfälle bei konstant gehaltenem Volumenstrom mit den ermittelten Schergeschwindigkeiten bei konstanter Schubspannung (vgl. Grafik 2)

Betrachtet man beim Kriechversuch die jeweiligen Schnittpunkte als Wertepaare bei konstanter Schubspannung τ_1 , so fällt auf, dass darin angelegte Tangenten für alle drei Chargen offensichtlich konstante Steigungen als Konsequenz der rheologischen Ähnlichkeit aufweisen (Grafik 2).

Im Gegensatz dazu weisen Tangenten in den Schnittpunkten konstanter Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ unterschiedliche Steigungen auf,

obgleich rheologische Ähnlichkeit für diese Proben vorliegt. Diese jeweiligen Schnittpunkte weisen auch auf eine deutliche Unterschiedlichkeit hinsichtlich des angetroffenen Fließverhaltens. So befindet sich diese z.B. für Probe C etwa am Übergang vom Newtonschen zum strukturviskosen Bereich, wohingegen sich bei gleicher Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ dieser Punkt für Probe A deutlich im strukturviskosen Bereich befindet (Grafik 2).

Im Gegensatz dazu kann man in den Schnittpunkten bei konstanter Schubspannung τ_1 erkennen, dass offensichtlich das Fließverhalten für alle drei Proben gemäß der Lage auf der Viskositätsfunktion die gleiche ist.

Als Schlussfolgerung wird deutlich: Obwohl der Schmelzindexversuch in der Regel nur eine Einpunktmessung darstellt, bietet dieser Kriechversuch einen zulässigen repräsentativen Vergleich, da das Fließverhalten unter vergleichbaren Spannungszuständen beobachtet wird. Im Gegensatz dazu liegen beim Stressing-Versuch keine vergleichbaren Fließeigenschaften vor. Hinzu kommt dessen schon herausgearbeitete deutlich schlechtere Differenzierbarkeit.

Neben den schon erwähnten kommerziellen Vorteilen und der übersichtlichen Handhabungspraxis, sind es insbesondere die messtechnisch relevanten Vorteile, welche die Schmelzindexmessung so bedeutend für die Polymerprüfung macht, insbesondere dann, wenn man strukturelevante Unterschiede detektieren will, wozu kleine bis mittlere Scherbeanspruchungen wie bei der Schmelzindexmessung möglich sind.

Echzeitkonforme rheologische Charakterisierung

Echzeit konforme Schmelzindexmessung

Seit Jahrzehnten gehört die Schmelzindexmessung bei der Polymerherstellung zu den wichtigsten “Best-Practice-Methoden”, um die Qualitätssicherung hinsichtlich der Erzielung konstanter Produktspezifikationen zu gewährleisten. Da die wichtigsten Herstellungsprozesse als kontinuierliche Prozesse ablaufen, stellte man sich in den 1970er Jahren die Frage, wie die bisher manuell betriebenen Labormessungen des Schmelzindex zu automatisieren sind, da die Nachteile des manuellen Probeziehens bis zur Generierung des Ergebnisses oft zu produzierten, außerhalb der Spezifikation liegenden “Off-Spec”-Chargen führten. Das förderte die Entwicklung sogenannter “Online-Rheometer”. Diese sind im finalen Prozessschritt mit dem Polymerisationsextruder verbunden. Durch integrierte Spinnpumpen wird ständig Schmelze dem Rheometer zugeführt und kontinuierlich vermessen.

Das Prozess-Rheometer, ein kontinuierlich messendes Schmelzindexprüfgerät

Die Bilder 4 und 5 zeigen exemplarisch ein einfaches System, wobei der Volumenstrom durch eine Spinnpumpe kontinuierlich vom Prozess entnommen und definiert geregelt durch die Düse extrudiert wird. Systembedingt ist ein Rheometer in der Lage, ein definiertes Spektrum der Viskositätsfunktion zu ermitteln. Diese Funktionalität wird jedoch in 9 von 10 Fällen gar nicht in Anspruch genommen, denn in erster Linie werden Online-Rheometer als kontinuierlich arbeitende “Schmelzindexer” eingesetzt.



Bild 4 Ansicht des kontinuierlich messenden Prozess-Rheometers MBR (**M**ini **B**ypass **R**heograph)

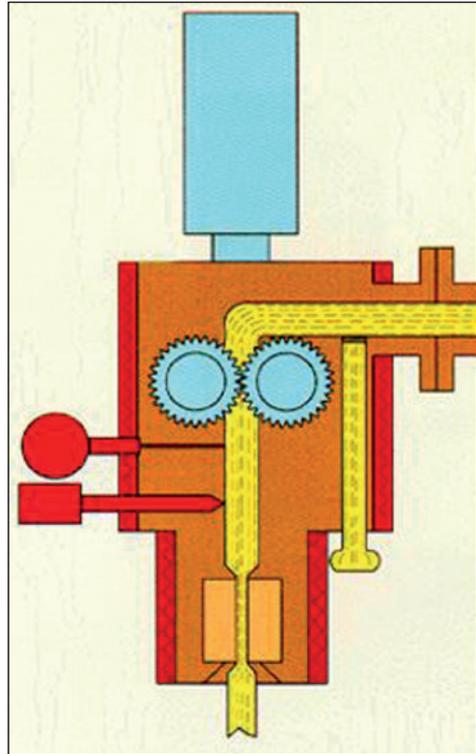


Bild 5 Schematische Darstellung des Prozess-Rheometers MBR (vgl. Bild 4)

Aus dem Schema des kontinuierlich messenden Schmelzindexprüfgerätes MBR (Bild 5) wird ersichtlich, dass der Bypassstrom vom Hauptextruder durch die Kapillare geführt wird und die Druck- und Temperaturmessung direkt vor der Kapillare erfolgt. Der Messbereich umfasst bis zu drei Dekaden mit einer Kapillare. Ein kleines inneres Volumen führt zur Reduzierung der Verweilzeit. Das Spülventil ermöglicht einen schnellen Produktwechsel.

Dieser Prüfmodus setzt voraus, dass der Druckabfall über der Kapillare konstant gehalten wird, vergleichbar mit dem Laborgerät. Dazu

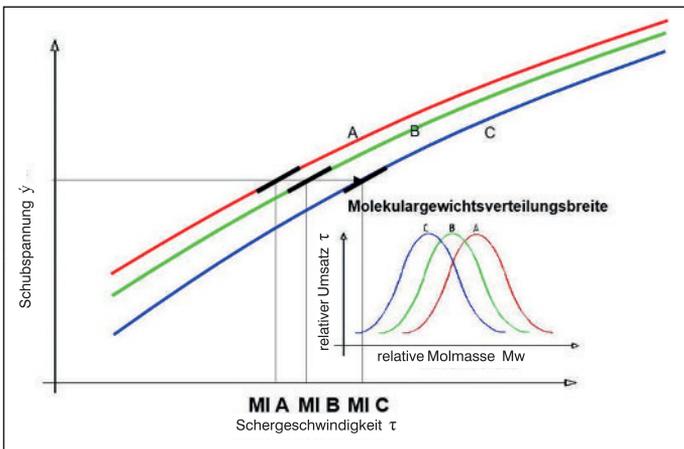
ist die Spinnpumpe in einen Regelkreis eingebunden, wobei der gemessene Druck vor der Düse als Regelgröße für die Pumpendrehzahl dient. Erhöht sich beispielsweise im laufenden Prozess die Viskosität, wird der Volumenstrom automatisch geregelt reduziert, damit der Druckabfall über der Düse konstant bleibt. Der sich daraus ergebende reduzierte Volumenstrom führt konsequenterweise zu einem niedrigeren Schmelzindexwert.

Ohne auf weitere Details einzugehen, kann ein Online-Rheometer keine exakte Schmelzindexmessung liefern, da die Strömungsverhältnisse

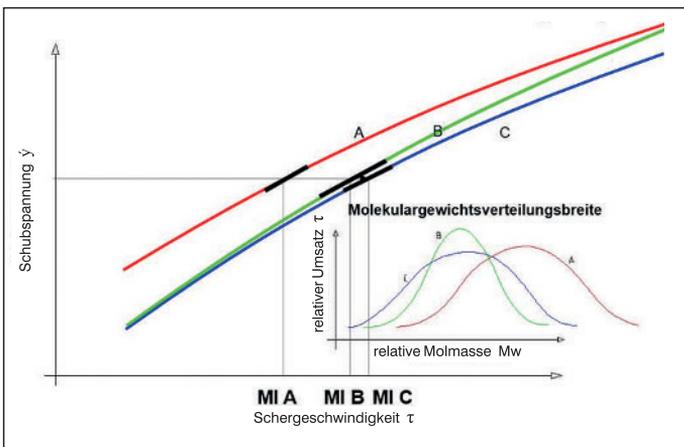
nisse in Kanal und Kapillare für beide Systeme nicht identisch sein können. Aber auch bei Prozess-Rheometern nutzt man die fundamentalen Zusammenhänge, die sich aus dem Kriechver-such ergeben.

Grafik 3 zeigt die Fließkurven dreier Polyolefin-Proben. Gemäß dem integrierten kleinen Schaubild sind die Molmassenverteilungen hier in etwa vergleichbar. Dies vorausgesetzt, ergeben sich in den Schnittpunkten bei kon-

stanter Schubspannung korrespondierende konstante Fließexponenten aufgrund gleichbleibender Steigungen der Tangenten. In Grafik 4 weicht Probe B ansatzweise von dieser Konstanz im Fließindex gegenüber A und C ab. Somit kann über die zusätzliche Ermittlung der Steigung, also des Fließexponenten um den Messpunkt konstanter Schubspannung, eine Aussage darüber gemacht werden, inwieweit sich die molekulare Struktur hinsichtlich der Verteilung möglicherweise geändert hat.



Grafik 3
Online-Schmelzindexbestimmung bei Materialien gleicher Polydispersität (MI: Schmelzindex Probe A, B und C)

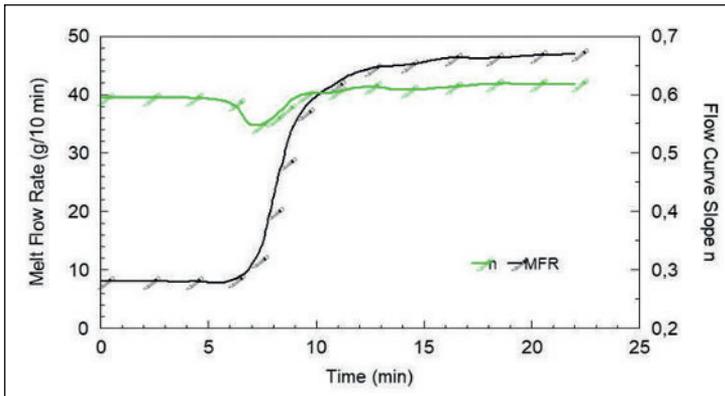


Grafik 4
Online-Schmelzindexbestimmung bei Materialien unterschiedlicher Polydispersität (vgl. Grafik 3)

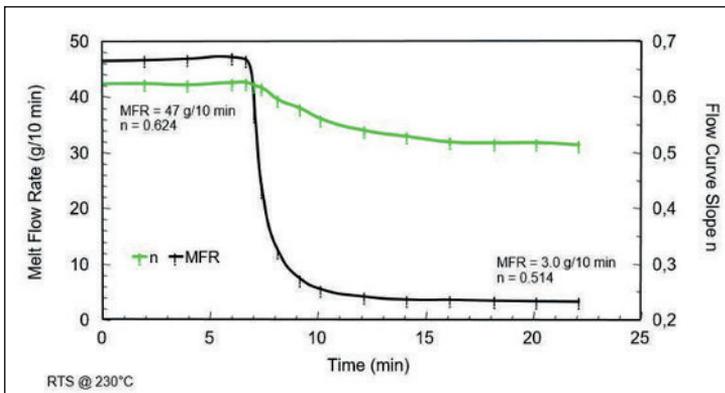
Diese Zusammenhänge nutzt man beispielsweise, um bei Produktwechselzyklen feststellen zu können, ob die Parametereinstellungen des Online-Rheometers beim Produktübergang noch zutreffend sind.

In Grafik 5 ist ein Produktwechsel eines Polypropylens PP2 mit MFR (Melt Flow Ratio) von ca. 9 g/10 min hin zu Type PP1 mit MVR (Melt Volume Ratio) von 0,7 dargestellt. Ebenso wurde der Fließexponent n im Bereich konstanter Schubspannung (welche äquivalent mit dem Druckverlust im Schmelzindexgerät ist) berechnet. Ausgenommen der unmittelbaren

Übergangszone weist der näherungsweise konstante Fließexponent darauf hin, dass beide Chargen in etwa rheologisch ähnlich sind. Daraus kann man auf eine unveränderte Molmassenverteilung schließen. Im Vergleich dazu zeigt Grafik 6 einen Produktwechsel, bei dem sich die ermittelten Fließexponenten im Bereich konstanter gehaltener Schubspannung signifikant veränderten. Mit sicherer Wahrscheinlichkeit passen diese beiden Chargen hinsichtlich deren Molmassenverteilung nicht mehr zusammen, da eine rheologische Ähnlichkeit fehlt. Der fallende Fließexponent lässt auf sich ändernde Polydispersität schließen.



Grafik 5
Online-Schmelzflussrate (MFR) beim Wechsel von Polypropylen PP2 auf PP1



Grafik 6
Online-MFR beim Wechsel von Polypropylen PP1 auf PP3 (vgl. Grafik 5)

Bild 6 zeigt schematisch das aktuelle Online-Rheometer RTS (**R**eal **T**ime **S**pectrometer) des Unternehmens. Durch den Einsatz von zwei geometrisch unterschiedlichen Kapillaren, die durch einen sich aufteilenden Volumenstrom über Spinnpumpen beschickt werden, ist man in der Lage, bei einer konstanten Druckeinstellung ein definiertes Spektrum der Viskositätsfunktion "instantan" (sofort, direkt) zu erfassen. Durch die Messung des Fließexponenten kann man in Istzeit die beschriebenen molekularen Zusammenhänge sofort ermitteln.

Eine der wichtigsten Eigenschaften von Online-Rheometern ist deren Antwortzeitverhalten, welche die Zeitdauer der Polymerentnahme und deren Vermessung beinhaltet. Je schneller und flexibler ein Rheometer Messergebnisse liefert, umso eher ist man auf Prozessseite in der Lage, mögliche Korrekturen durchzuführen und gleichzeitig zu verhindern, Qualitäten zu

produzieren, welche außerhalb der Toleranz liegen.

Die druckgesteuerte Fahrweise von Online-Rheometern weist eine zwangsläufige Abhängigkeit hinsichtlich des Antwortzeitverhaltens auf, welche direkt mit dem MVR korreliert. Je höher molekular die Polymere werden, desto länger dauert der Materialaustausch in der Schmelzeleitung und Kapillare, da bei konstant gehaltenem Druckabfall über der Kapillare der korrespondierende Volumenstrom (aus dem der MVR berechnet wird) umso geringer wird, je höher die Viskosität ansteigt. Dem entgegen wirkt der Einsatz einer weiteren Schmelzenpumpe, welche unabhängig von den Messpumpen mit hoher Durchsatzleistung die Schmelze vom Prozess an die Messpumpen heranführt. Dadurch kann eine signifikante Verbesserung des Antwortzeitverhaltens herbeigeführt werden.

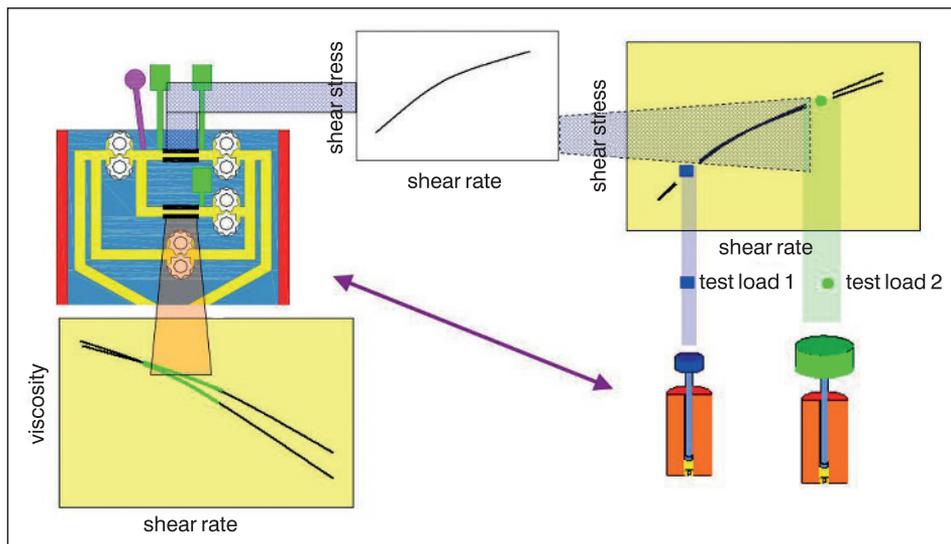
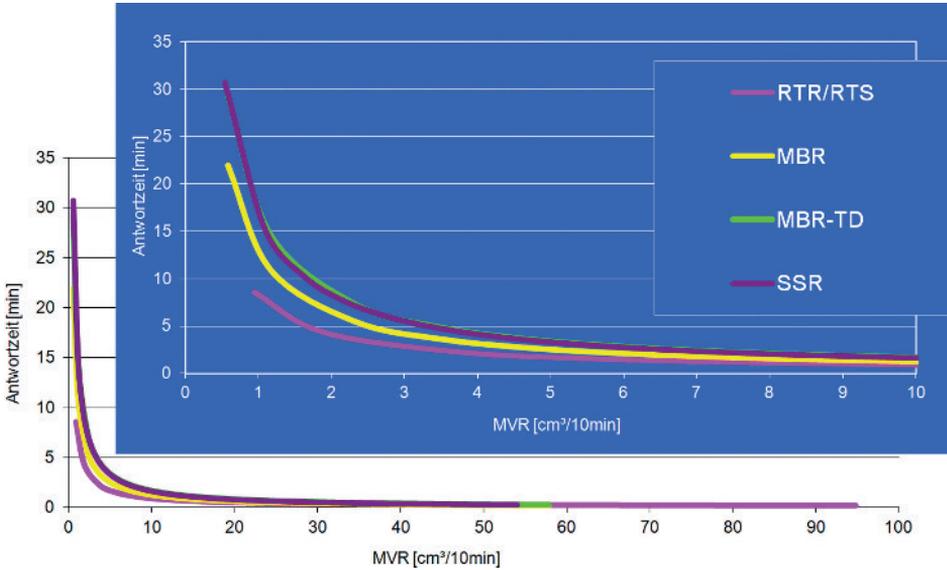


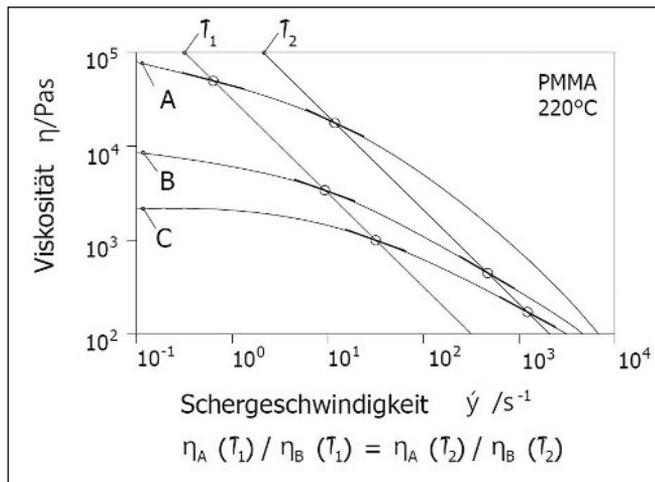
Bild 6 Messung des Schmelzindex (MI) und der davon korrelativ abgeleiteten Polydispersität – schematische Gegenüberstellung von diskontinuierlich arbeitendem "Zwei-Last Indexer" und simultaner Online-Messung mit dem aktuellen Online-Rheometer RTS



Grafik 7 a+b Antwortzeitverhalten verschiedener Rheometer (vier Produktbeispiele)

Die Grafiken 7 a+b zeigen die Antwortzeitfunktionen verschiedener Online-Rheometer mit und ohne zusätzlicher Förderpumpe, welche insbesondere bei kleinen Schmelzindices bis zu fünfmal schneller reagieren können. Die fundamentalen Zusammenhänge, die der Kriechversuch birgt, macht man sich auch hinsichtlich einer Optimierung des Antwortzeitverhaltens zunutze.

In Grafik 8 sind bei den schon bekannten PMMA-Chargen (Grafik 2) zwei Geraden eingezeichnet, die zwei Spannungszustände τ_1



Grafik 8

Viskosität in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit – die Fließexponenten sind in Punkten konstanter Spannung gleich (vgl. Grafik 2)

und τ_2 repräsentieren. Ermittelt man nun beispielsweise die jeweiligen Viskositätswerte für Charge A und B bei identischer Schubspannung τ_1 und setzt diese in Relation zu den korrespondierenden Viskositätswerten bei τ_2 für A und B, dann sind diese identisch. Mit anderen Worten: man würde kein Differenzierungspotential einbüßen, wenn man die MVR-Messung nicht im Bereich der korrespondierenden Spannung τ_1 durchführt, sondern das Messfenster zum höheren Wert τ_2 verschiebt und über eine einfache Faktorisierung auf den tatsächlichen τ_1 -Bereich zurückrechnet. Mit dem wahlweisen "Wandern" auf der Viskositätsfunktion zu höheren Schubspannungswerten verkürzt man gleichzeitig das entsprechende Antwortzeitverhalten, ohne auf Messempfindlichkeit hinsichtlich der Differenzierbarkeit zu verzichten. Im Ergebnis dessen ist der Fließexponent bei konstanter Schergeschwindigkeit ("shear stress") ebenfalls konstant.

Die Hochdruck-kapillarrheometrie

Das Standard-Kapillarrheometer

55 Jahre nach der Einführung des ersten Kapillarrheometers ist heute dessen Stellung in der Entwicklung und Forschung polymerer Werkstoffe nicht mehr wegzudenken. Auf der Basis des einfachen Kanal-Stempelsystem sind über die Jahre eine Vielzahl optionaler Prüfmethoden entstanden, die ein modernes Rheometersystem zu einer universellen Testplattform werden ließen.

1962 wurde von der Firma GÖTTFERT das erste Hochdruck-Kapillarrheometer auf den Markt gebracht (Bild 7). Bild 8 demonstriert anhand der schematischen Darstellung die Wirkungsweise eines Kapillarrheometers. Die aktuelle Neuentwicklung erweitert das Anwendungspotenzial dieses Rheometertyps beträcht-

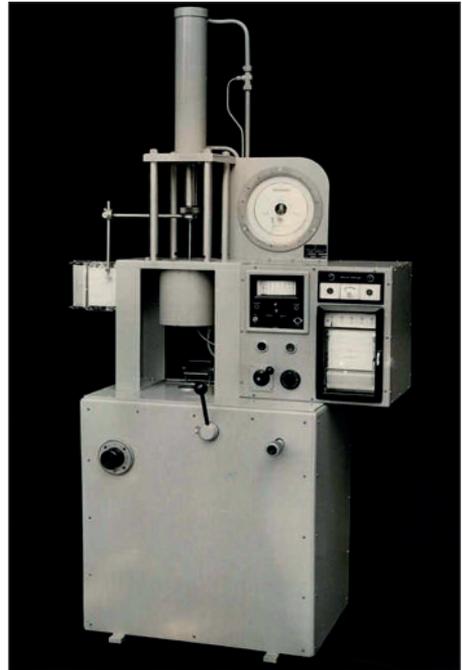


Bild 7 Das erste Hochdruck-Kapillarrheometer HKV 1000/1600 der Firma GÖTTFERT, 1962

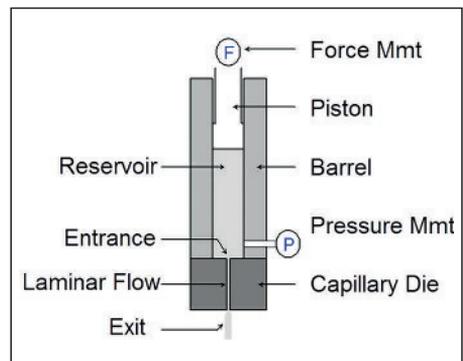


Bild 8 Schematische Darstellung eines Kapillarrheometers

(**Legende:** F – Krafteinstellung, P – Druckmessung, Barrel – Zylinder, Piston – Stempel, Laminar Flow – laminarer Fluss durch die Kapillare)



lich. Bild 9 zeigt exemplarisch dieses moderne System (die zugehörigen technischen Daten sind dem Kasten zu entnehmen).

Vom Prinzip her ist ein Kapillarrheometer ein diskontinuierlich messender Stempelextruder (Bild 8). Das Prüfmaterial wird in den Kanal eingebracht, verdichtet und aufgeheizt. Diese Funktionalität ist für die meisten Polymere vollkommen ausreichend. Jedoch sind viele Materialien bekannt, die sich zumindest schlecht in den Prüfkanal beschicken lassen, wie beispielsweise Gummimischungen. Ebenso ist das statisch, stationäre Aufheizen der Probe im Kanal (beispielsweise für PVC-Mischungen) nicht ausreichend, da dieses Polymer ohne mechanisch wirkende Aufbereitung keine vergleichbaren Schmelzeigenschaften erhält, wie dies in einem Schneckenextruder erzielt wird.

Bild 9
Modernes Standard-Kapillarrheometer –
Basisgerät RG 50
(Technische Details im unten-
stehenden Kasten)

Basis Gerät RG25 oder RG50

- Hohe Stempelkraft von 25 oder 50 kN im gesamten Arbeitsbereich
- Ein-, Zwei oder Dreikanal System
 - Ø 9,55, 12, 15, 20, 25, 30 or 35 mm Prüfkanal -
- Geschwindigkeitsbereich 0.00004 – 40 mm/s
- Temperaturbereich bis 500°C
- Hohe Stempelbeschleunigung
 - 0 to 40 mm/s in nur 0.6 sec
- Hohe Wegauflösung des Encoders 0.0000016 mm/step
- Automatische Druckaufnehmererkennung "Plug & Test"

“Contifeed”: Schneckenextruder beschickt Stempelextruder

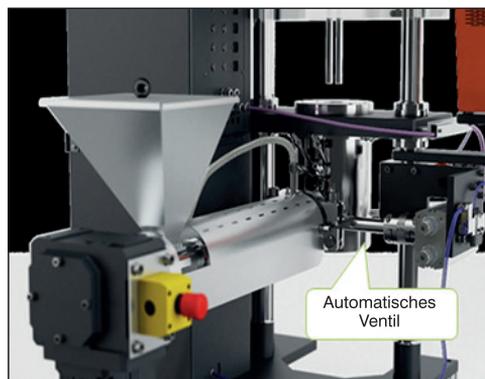
Ein neuer Gedanke, die beschriebene Problematik zu lösen, wurde mit dem “Contifeed” realisiert (Bild 10). Hierbei handelt es sich um ein Zwei-Kanal-System, mit dem die Beschickung beider Kanäle simultan und kontinuierlich erfolgen kann. Der Prüfkanal des Rheometers wird in diesem Fall mit einem Schneckenextruder verbunden, der kontinuierlich oberhalb der Kapillare Material einspeisen kann (Bild 11). Die mit Mini-Extruder ausgerüsteten Basisgeräte RG 25 und RG 50 (“Contifeed”)



zeichnen sich aus durch automatische Schmelzebeschickung direkt in den Zylinder (D20x10D - D20x25D) und Kühlung der Einzugszone über ein Flüssigtemperiersystem. Der Extruder ist leicht abzukoppeln und die Schnecke ist einfach auszubauen. So ermöglicht der modulare Aufbau ein schnelles Reinigen. Ein hoher Bedienkomfort wird erreicht durch die einfache Montage und das Einschwenken des beweglichen Extruders sowie seine Ankopplung über Klemmflansch. Während des Messvorgangs erlaubt ein Bypassventil für Extruderbetrieb das Spülen.

Zu Beginn des Füllens befindet sich der Prüfstempel direkt über der Kapillare. Wird nun extrudiertes Material zugeführt, weicht der Stempel diesem aus, da die Druckmessung im Prüfkanal eine Regelgröße darstellt, welche den Stempel aktiviert. Ist der Kanal vollständig gefüllt, d.h. der Prüfkanal in der obersten Position, leitet ein Dreiwegeventil, das sich zwischen Extruder und Rheometer befindet (Bild 10 b), die Probe ins Freie. Gleichzeitig kann die

Bild 10 a+b
Ansicht des “Contifeed”-Kapillarrheometers mit Basisgerät RG 25 (nebenstehend) und seitlicher Einrichtung für simultane Beschickung beider Kanäle (unten)



Messung beginnen. Zwei zentrale Vorteile dieser Art der Rheometerbeschickung sind evident:

- Durch die Drucksteuerung wird das Material definiert, homogen und blasenfrei eingetragen.
- Durch die mechanische Förderung im Schnecken-Zylinderteil erfolgt eine homogenisierende Aufbereitung, hier Vorscherung genannt, welche die Probe ideal für den kapillarrheometrischen Versuch vorbereitet.

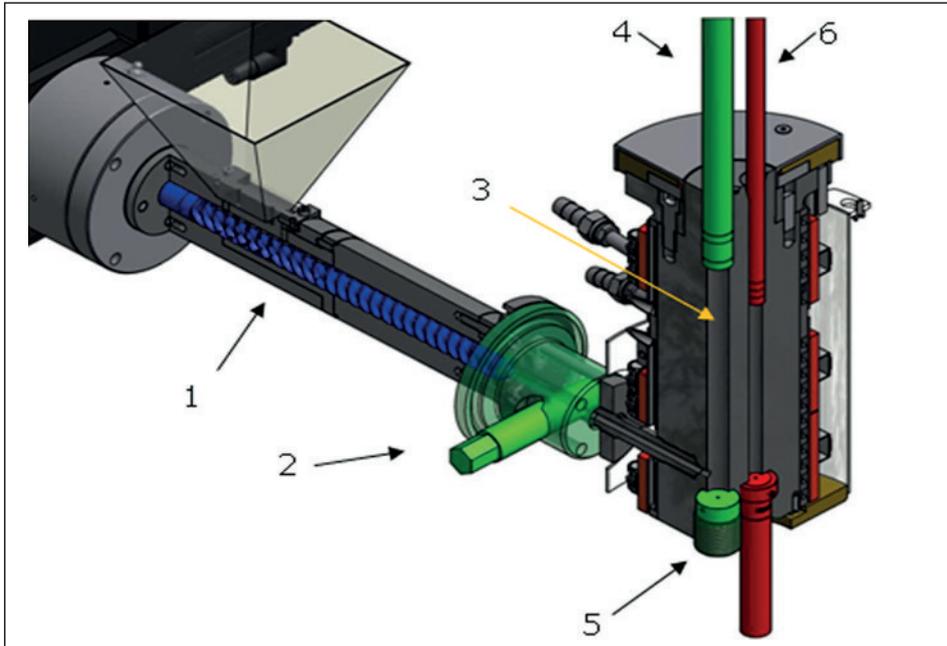


Bild 11
Schematische Darstellung des
Prinzips "Contifeed"
(Detailangaben siehe Kasten)

Prinzip 'Contifeed'

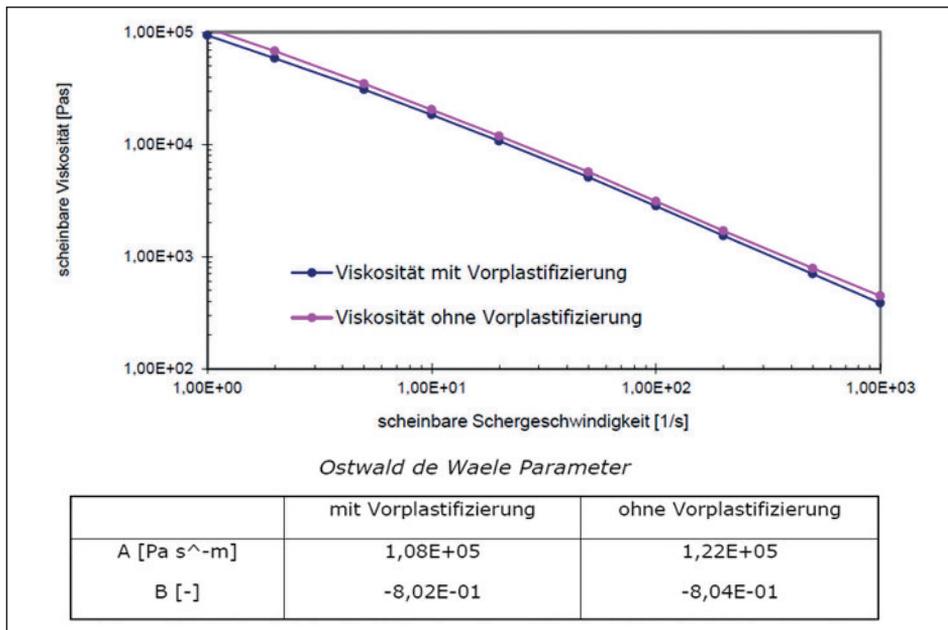
- Schmelzkanal direkt in den Prüfkanal (1, blau)
- Druckmessung und Bypass-Ventil am Kanaladapter (2, grün)
- Füllposition des Prüfkanals (3)
- Stempel (4, grün)
- Messkapillare (5, grün)
- Einfache Reinigung durch Spülen mit neuer Probe
- Zweikanalsystem mit separate Kanal für PVT (6 rot)

Einfluss der Vorscherung auf die Viskositätsfunktion

Inwieweit das extrudierende Beschicken des Rheometers einen Einfluss auf das Fließverhalten unterschiedlicher Materialien aufweist, zeigt Grafik 9 am Beispiel der Viskositätsfunktionen einer Gummimischung. Die rote Kurve repräsentiert die Messung, die der klassischen manuellen Beschickung des Kanals folgte, wohingegen in einer weiteren Messung die Mischung durch den integrierten Vorplastifizierungsextruder („Contifeed“) in den Kanal befördert wird. Besagte Vorplastifizierung führt gemäß der ermittelten Parameter nach OSTWALD DE WAELE zu einer Reduzierung der Viskosität um ca. 12%. Diese erstreckt sich über den gesamten Schergeschwindigkeitsbereich.

In einem weiteren Versuch ging man der Frage nach, inwieweit Kriterien der Verarbeitbarkeit unter der Berücksichtigung der Vorscherung ihren Niederschlag bei der Viskositätsmessung finden. Als Beispiel dienten fünf Reifencompounds, die sich nach einer einfachen „gut-schlecht“ Beschreibung differenzieren ließen (Tab. 2). Als Extrembeispiele ragten heraus: Reifencompound 1, der sich sowohl schlecht extrudieren ließ als auch ungenügendes Schwellen zeigte, und Reifencompound 4, bei dem diese Eigenschaften mit gut bis sehr gut eingeschätzt werden konnten.

Um insbesondere das Schwellen der Mischung rheologisch zu charakterisieren, wurden neben den korrigierten Viskositätsfunktionen zusätzlich die dehnelastischen Eigenschaften bestimmt. Unter Zuhilfenahme der gemessenen



Grafik 9 Einfluss auf das Fließverhalten unterschiedlicher Materialien beim extrudierenden Beschicken des Rheometers (Parameter siehe Kasten)

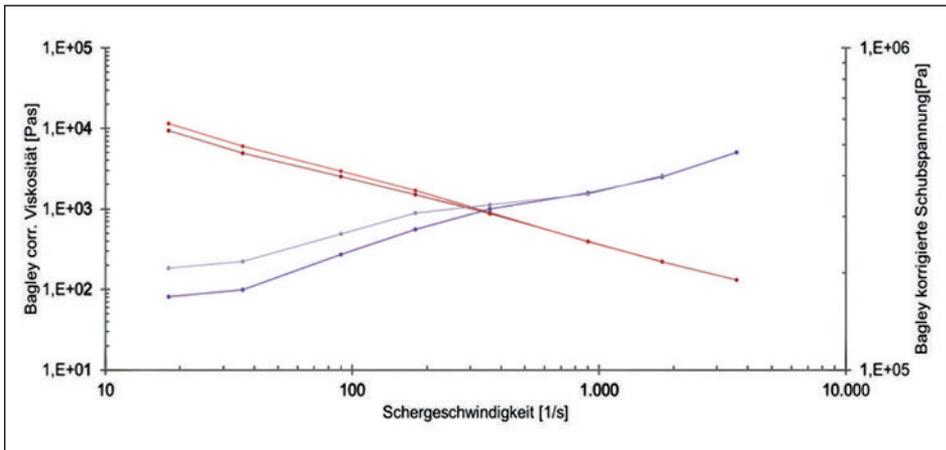
	Compound 1	Compound 2	Compound 3	Compound 4	Compound 5
Polymer Blend	1	1	2	2	2
	Silica 1	Ruß 1	Silica 2	Silica 1	Ruß 2
Extrudierbarkeit	schlecht	gut	gut	gut	gut
Schwellen	schlecht	gut	akzeptabel	sehr gut	gut

Tabelle 2 Untersuchungen des Einflusses der Vorplastifizierung auf Einlaufdruckverlust und Wandgleiten am Beispiel von fünf Reifencompounds

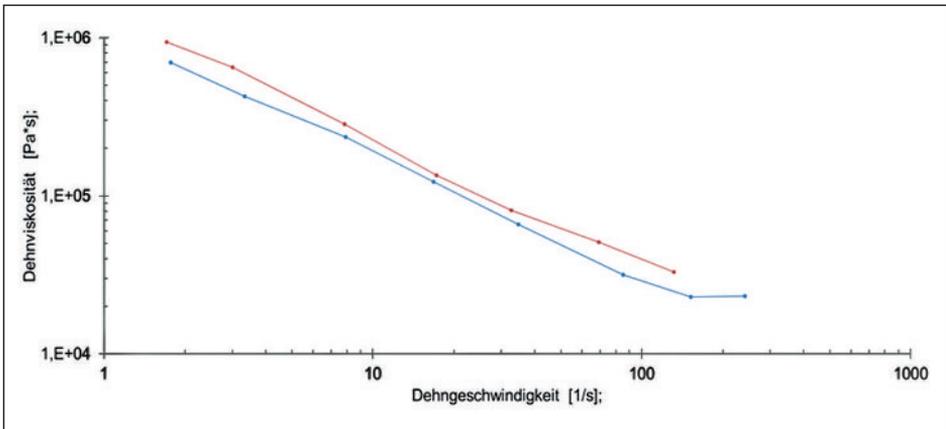
Einlaufdruckverluste in Verbindung mit dem Ansatz nach COGSWELL, ließ sich im gemessenen Schergeschwindigkeitsbereich die Dehnviskosität bestimmen. Wie schon bei der ersten Versuchsreihe deutlich wurde, lagen die Viskositätswerte für Reifencompound 1 ohne Vorscherung über denen mit Vorscherung (Grafik 10). Die gleiche Tendenz zeigte ebenfalls die Dehnviskosität, wobei der Einfluss der Vorscherung noch größer war (Grafik 11). So führte die Vorscherung zu einer Reduzierung der Viskosität um 24%, wohingegen die Dehnvis-

kosität um 34% niedrigere Werte lieferte, wenn das Material durch den “Contifeed” vorge-schert wurde.

Bei Reifencompound 4 stellte sich heraus, dass der Einfluss der Vorscherung auf die Viskosität mit 2 % eher unerheblich war. Im Gegensatz dazu reagierte die Dehnviskosität auf die Vorscherung umso empfindlicher, denn dieser Einfluss reduzierte die Dehnviskosität um mehr als 40%.



Grafik 10 Einfluss der Vorscherung auf die korrigierte Viskositätsfunktion und die korrigierte Schubspannung (Reifencompound 1, obere Kurve ohne und untere Kurve mit Vorplastifizierung)



Grafik 11 Einfluss der Vorschichtung auf die Dehnviskosität (Reifencompound 1, obere Kurve ohne und untere Kurve mit Vorplastifizierung)

Viskoelastizität, ermittelt aus der Druckströmung

Rheometersysteme, wie die Kapillarrheometrie, die grundsätzlich die Eigenschaften einer Druckströmung kennzeichnen, können aus dem Gesamtspannungstensor nur die Komponente der stationären Schubspannung ermitteln. Darüber hinaus ist es in der Regel mit einem Kapillarrheometer auch nicht möglich, direkte Zusammenhänge der Viskoelastizität zu erfassen, welche Fundamentales zur polymeren Struktur liefern könnten.

Obleich rotationsrheometrische Systeme bestens etabliert sind, um viskoelastische Zusammenhänge aufzuzeigen, sind diese in erster Linie manuell zu betreiben, und bieten somit keine Grundlage, um kontinuierlich unter Echtzeit Produktionsprozesse zu kontrollieren oder gar zu steuern.

Jüngster Vorstoß in diese Richtung ist ein Kapillarsystem, welches in ein gekoppeltes Prüfstampelpaar integriert ist (Bild 12). Die

Druckaufnehmer befinden sich vor und hinter der Düse. Somit kann durch Spinnpumpen, die aus einem kontinuierlich fördernden Extruder Schmelze führen, der Druckabfall über der Düse gemessen werden, woraus sich dann die stationäre Viskosität ermitteln lässt. In einem weiteren Prüfmodus kommt durch Stillstand der Pumpen die Schmelze zur Ruhe. Durch einen integrierten Sinuserreger werden die fest gekoppelten Stempel einer sinusförmigen Oszillation zwischen 0,01 und 30 Hertz (Hz) unterworfen. Konstruktionsbedingt erfolgt dies bei einer festvorgegebenen Amplitude.

Korrespondierend zur Erregung, erfassen die Druckaufnehmer den sinusförmigen Druckverlauf der Oszillation. Aus dieser Phasenverschiebung zwischen Erregung und Antwort, von den Druckwerten gemessen, lassen sich die komplexe Viskosität mit den Spannungskomponenten G' (elastischer Modul) und G'' (viskoser Modul) bestimmen. Nach Beendigung der Messreihe wird die Kapillare durch das Wiederanlaufen der die Schmelze fördernden Spinnpumpen gespült. Bild 13 zeigt den ersten

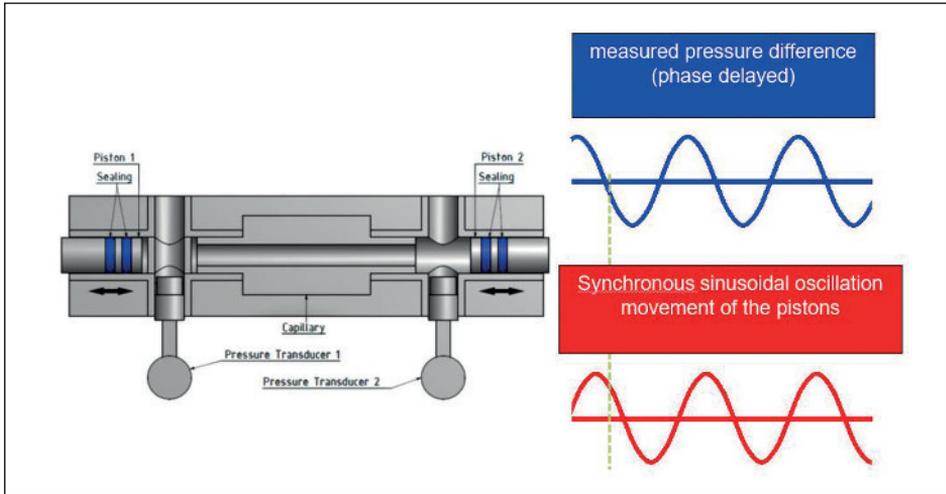


Bild 12 Schematische Darstellung eines Kapillarsystems mit gekoppeltem Prüfstampelpaar

Prototypen dieses neuartigen Rheometersystems, welches als **dynamisch arbeitendes Online-Rheometer (DOR)** bezeichnet werden kann.

Es besticht durch seine technischen Eigenschaften:

- Kontinuierliche Bestimmung viskoelastischer Eigenschaften von Polymerschmelzen.
- Online Bestimmung von G' und G'' im Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 25 Hz.
- Online Bestimmung der Viskosität und des Schmelzindex.

Erster Schritt in Richtung einer möglichen Validierung dieser neuen Technologie, war der direkte Vergleich mit einem konventionellen Rotationsrheometer des Platte-Kegeltyps. Grafik 12 zeigt die bei 190° gemessenen Module G' und G'' eines LDPE. Vergleichbare Resultate mit guten Übereinstimmungen zwischen beiden Rheometer-

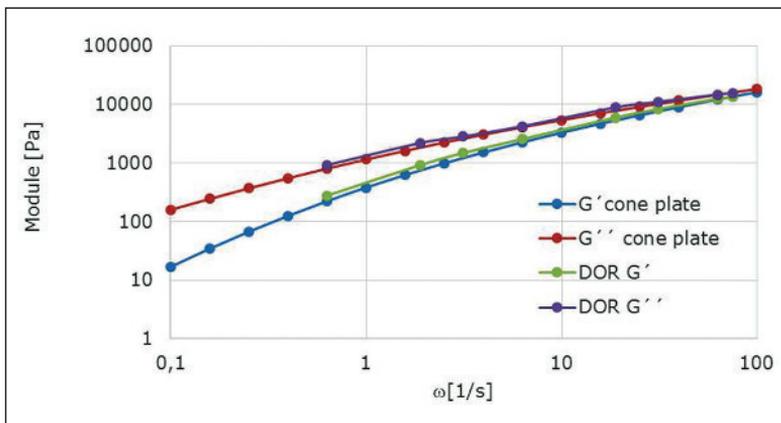


Bild 13
Neuartiges Rheometersystem – das
“**D**ynamic **O**nline **R**heometer”(DOR)

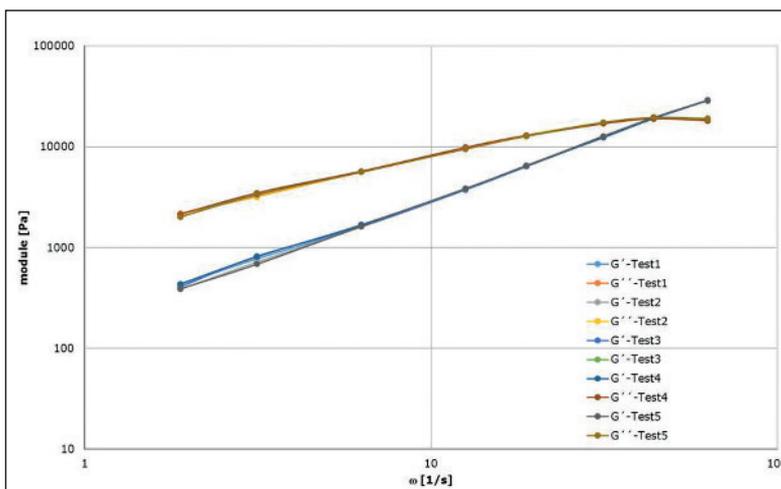
systemen erhielt man auch für ein weiteres LDPE, gemessen bei 170°. Die Ergebnisse für beide Rheometersysteme decken sich größtenteils.

Teil jedes Validierungsprozesses ist die Überprüfung der Wiederholgenauigkeit und Reproduzierbarkeit. Grafik 13 zeigt die Ergebnisse von fünf an mehreren Tagen durchgeführten Versuchen, die zu guten Übereinstimmungen führte.

Die Möglichkeit der "instantanen", kontinuierlichen Messung viskoelastischer Eigenschaften direkt im Produktionsprozess, bzw. diesem zumindest unter Echtzeit folgend, stellt nun mit Hilfe von DOR einen weiteren Schritt dar, die grundsätzlichen Vorteile von Druckströmung unterliegender Rheometer zukünftig als bewährte "Best-Practice-Methode" in der Polymerindustrie zu etablieren.



Grafik 12 Vergleich für G' und G'' zwischen DOR und Platte-Kegel-Rheometer (PE 1 190°C)



Grafik 13 Wiederholbarkeits- und Reproduzierbarkeits-tests mit beiden Rheometersystemen

Standortbestimmung und Ausblick

Mit einer Vision für die zukünftige Entwicklung und mit Beharrlichkeit, Ausdauer und Fleiß gründete Otto GÖTTFERT vor 55 Jahren ein Unternehmen, das heute zu den maßgeblichen Herstellern rheologischer Prüftechnik gehört. Das unabhängige Familienunternehmen verfolgt heute konsequent die Weiterentwicklung seiner Produkte, die auch in Zukunft den Stand der Technik repräsentieren sollen. Mit einem Höchstmaß an Technologie, bester Qualität und einem kundenorientierten Service verfügt das Unternehmen über die entscheidenden Rahmenbedingungen, die als Garantien für einen dauernden Unternehmenserfolg gelten.

Vom Anbeginn der Firma GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH ist bis heute ein weiter, teils beschwerlicher, aber auch sehr erfolgreicher Weg zurückgelegt worden. Die Firma entwickelt und produziert autarke Prüf- und Messtechnologie zur Ermittlung der Fließ-eigenschaften von Hochpolymeren. Darunter fallen die meisten Kunststoffe, Elastomere und Duomere. Die Firma, die zahlreiche interna-

tionale Patente auf diesem Gebiet hält, arbeitet bei der Entwicklung neuer Produkte mit den namhaftesten Universitäten und Forschungseinrichtungen im In- und Ausland zusammen.

Begonnen hatte 1962 alles in den Gebäuden der alten Kettenmühle in Buchen im Odenwald/Baden-Württemberg (Bild 1, Seite 4). Bereits 1963 wurde ein Fabrikneubau in der Siemensstraße errichtet (Bild 14), der bis 1985 ständig erweitert worden ist (Bild 15).

Kontinuierliches Wachstum des Umsatzes und der Mitarbeiterzahlen führten Anfang der 2010er Jahre zu beengten Produktionsverhältnissen und notwendigen Überstunden, um alle Aufträge erfüllen zu können. Außerdem verlangten Erweiterungen des Produktportfolios und Aufträge aus der Pharmaindustrie abgetrennte Fertigungsbereiche für Reinraumgeräte. Doch aus Platzgründen waren ein weiteres Wachstum und die Optimierung der Fertigungsabläufe nicht mehr möglich. Für eine notwendige und zielgerichtete Strukturverbesserung hinsichtlich optimier-



Bild 14
Neubau in der
Siemensstraße in
Buchen, 1963



Bild 15
Erweiterungen
bis zum Jahre
1985

ter Produktionsprozesse wurde 2015 ein Gesamtkonzept aus Neubauerweiterung und Modernisierung im bestehenden Gebäudekomplex der Firma in der Siemensstraße erarbeitet.

Die Maßnahme wurde in mehreren aufeinander abgestimmten Abschnitten umgesetzt. Der erste Abschnitt war die Erweiterung der Produktionsfläche um ca. 900 m². Optimale Belüftung und natürliche Beleuchtung mit entsprechenden Dachkuppeln und Lichtinnenhof standen im Mittelpunkt des Konzeptes, um optimale Arbeitsbedingungen zu schaffen. Für das gesamte durchzuführende Projekt waren 4,5 Mio. € veranschlagt. Bis Ende 2016 konnte die

900 m² große Erweiterungshalle fristgerecht fertiggestellt werden (Bild 16).

In einem zweiten Bauabschnitt wurde im Südosten des Standortes (Vordere Wanne/Siemensstraße) ein 400 m² großer Erweiterungsbau errichtet, der neben Büroflächen in erster Linie der Erweiterung des Kundenbereichs diente, mit Labor- und Präsentationsflächen im Erdgeschoss und Seminar- und Schulungsräumen im Obergeschoss (Bild 17).

Vor allem profitierte davon das im Erdgeschoss liegende anwendungstechnische Labor/Prüflabor, das um 50 % erweitert worden ist.



Bild 16 Fertigstellung der neu erbauten, 900 m² großen Produktionshalle, 2015/16



Bild 17 Neubau eines neuen Verwaltungstraktes mit Kundenbereich, Seminarräumen und Laboratorien, 2016/17

Nachhaltiger Umwelt- und Klimaschutz, basierend auf effizienter Blockheiztechnik und Photovoltaik, waren tragende Bestandteile der umfangreichen Baumaßnahmen der Jahre 2015-17. Neben den Prüf- und Messsystemen ist mittlerweile ein neues Produktportfolio im medizinischen Bereich entstanden. Hierbei handelt es sich um sogenannte RAM-Extruder, die dank ihrer hohen Genauigkeit bei der Temperaturführung und Präzisionsförderung auch kleinstmögliche Produktmengen herstellen können, die gerade im Bereich medikamentöser Implantate ideale Anwendung finden.

Durch die erfolgreiche Erweiterung der mechanischen und elektrischen Fertigung konnte die Herstellungsdauer der Geräte im Durchschnitt um mindestens 20% reduziert werden und es ergaben sich Beschäftigungsmöglichkeiten für zusätzliche Mitarbeiter. Der Anspruch der Firma auf die technologische Führerschaft auf

dem Gebiet der Prüfmaschinen wurde dadurch erhalten und stärkte den vorhandenen Wettbewerbsvorteil. Insofern fügte es sich trefflich, die maximal möglichen Förderleistungen aus dem EU-Fond für den ländlichen Raum erhalten zu haben: *“Spitze auf dem Land! – Technologieführer Baden-Württemberg.”*

“Keine Spitzenleistung ohne Mitarbeiter, die Spitze sind”. Die Firma GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH baut seit vielen Jahren erfolgreich auf die eigene Aus- und Weiterbildung, vor allem in den technischen Berufssparten. Sowohl die klassische Ausbildung des Industriemechanikers als auch die diversen Berufsbilder in der Elektrotechnik und Informatik bis hin zu den universitären Bachelorgraden im Maschinenbau, in der Mechatronik und der Informatik – die Firma bietet hier interessante und anspruchsvolle Beschäftigungsmöglichkeiten. ■

Literaturverzeichnis

- [1] ORTHMANN, H.J.: Bestimmung des Fließvermögens reiner und modifizierter Polystyrol-Spritzgussmassen durch Schmelzindex-Messung, in: *Kunststoffe* **10**, 1962
- [2] MERZ, E.H., COLWELL, R.E.: *ASTM Bulletin* No. 232, 1958 24

Autorenvorstellung



Axel GÖTTFERT

- 3.5.1954 geboren in Emmerich am Rhein/Nordrhein-Westfalen
- 1965-71 Burghardt-Gymnasium Buchen im Odenwald/Baden-Württemberg
- 1972-75 Wirtschaftsgymnasium Walldürn/Odenwald, Abitur
- 1976-77 Studium der Volkswirtschaftslehre an der Universität Heidelberg
- 1978-81 Studium Wirtschaftsingenieurwesen an der Fachschule Karlsruhe, Diplom
- 1981 “Work-Study”- Stipendium der Carl-Duesberg-Gesellschaft für die USA
- 1981-83 Studium “Industrial Marketing” am Georgia Institute of Technology (“Georgia Tech”), Atlanta/USA
- 1983-84 Produktmanager für Mess- und Regelungstechnik bei AUTOMATIC Inc., Stamford CT/USA
- 1984 Verkaufsleitung bei der GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH
- 1991 Bestellung zum Geschäftsführer der GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH
- 1992-93 Externe Qualifikation zur Promotionszulassung an der Universität Halle-Wittenberg, Fachbereich Werkstoffwissenschaften
- 1993-96 Promotion zum Dr.-Ing. bei Prof. Dr. Rainer SCHNABEL mit dem Thema: “Prozesszeitkonforme, rheologische Charakterisierung von Polymerschmelzen in der Scherung und Dehnung”

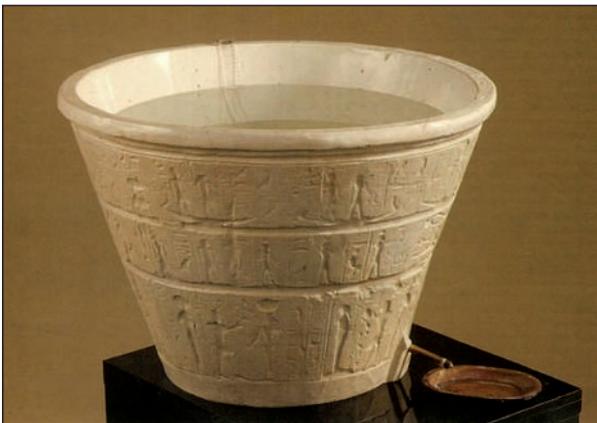
RHEOLOGIE – ESSENTIELLES INSTRUMENT DER POLYMERWERKSTOFFENTWICKLUNG

von Hans-Joachim Radusch

Was ist Rheologie?

Die Rheologie ist die Wissenschaft, die sich mit dem Fließ- und Verformungsverhalten von Materie beschäftigt. Der Ursprung des Begriffes "Rheologie" liegt in der griechischen Sprache (altgriechisch: $\rho\acute{\epsilon}\iota\nu$ rhein "fließen" und $\lambda\acute{o}\gamma\omicron\varsigma$ logos "Lehre") und bedeutet damit "Fließkunde". Der in diesem Zusammenhang bekannteste Ausspruch ist "*Panta Rhei!*" – "*Alles fließt!*" Er steht eigentlich für den Aphorismus zur Kennzeichnung der Lehre des griechischen Philosophen HERAKLIT (535-475 v. Chr.) zum Verständnis der Welt und der Gesellschaft – der sogenannten "Flusslehre". Nach dieser liegt die primäre Welterfahrung in dem fortwährenden Stoff- und Formwechsel, was bedeuten soll, dass die Welt auf ewigem Werden und Vergehen beruht. Die Flusslehre ist nach DIETZ [1] sozusagen eine Metapher für die Prozessualität der Welt.

Die heute geläufige Bezeichnung "Rheologie" für die Wissenschaftsdisziplin geht auf den Chemiker Eugene Cook BINGHAM zurück, der auch auf dem Gebiet der Plastizitätstheorie tätig war. Die Namensgebung war von HERAKLITs Aphorismus "*panta rhei*" inspiriert [2].



Als Wissenschaftsdisziplin umfasst die Rheologie Teilgebiete der Elastizitätstheorie, der Plastizitätstheorie und der Strömungslehre. Sie beschäftigt sich sowohl mit kontinuumsmechanischen Problemen als auch mit der Herleitung der dafür benötigten Materialgesetze aus der Mikro- bzw. Nanostruktur verschiedener Klassen kondensierter Materie (z. B. makromolekulare Systeme, Suspensionen) [3]. Bereits der Ägypter AMENEMHET (18. Dynastie) berücksichtigte im 15. Jh. v. Chr. die Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Wasser bei der Konstruktion seiner Wasseruhr. AMENEMHET erkannte, dass die Viskosität von Wasser nachts infolge niedriger Temperaturen höher als tagsüber ist und berücksichtigte dies durch eine Anpassung des Anstellwinkels der Drainage um 7° . Damit gilt er als Erster, der sich mit rheologischen Fragestellungen auseinandersetzte [2].

Heute gibt es kaum ein technisch relevantes Gebiet, in dem die Rheologie keine Rolle spielt. Die Kenntnis und Anwendung rheologischer Gesetzmäßigkeiten ist für die Auslegung von Prozessen und die Gewährleistung der Produktqualität von ausschlaggebender Bedeutung. Dies trifft gleichermaßen für die Lebensmittelindustrie (z.B. Schokolade, Teigwaren, Milchprodukte), Metallurgie (z.B. Schmelzgießen, Umformen), Geologie (Lava), Medizin (Blut), Drucktechnik (Farben), Oberflächentechnik

Bild 1
Altägyptische Auslaufuhr aus
Theben um ca. 1400 v. Chr.,
Konstruktion nach AMENEMHET
[4]

(Beschichtungen) und vor allem auch die Kunststofftechnik (kontinuierliche Herstellung von Extrusionserzeugnissen, Spinnfasern, diskontinuierliche Herstellung von Formteilen im Press- oder Spritzgussverfahren, Schaumstoffherstellung) zu. Dabei zeigen die Stoffe je nach ihrer Zusammensetzung und Beschaffenheit durchaus unterschiedliches rheologisches Verhalten, was sich in der Abhängigkeit deren Fließvermögens von der Beanspruchung ausdrückt (Bild 2). So wird neben dem NEWTONschen Verhalten, das durch einen linearen Zusammenhang zwischen Schubspannung τ und Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ charakterisiert ist, noch unterschieden zwischen dem nichtlinearen pseudoplastischen bzw. "dilatanen" (lat.: verzögernden) Verhalten und dem Verhalten eines Fluids mit sogenannter Fließgrenze, d.h. nicht-NEWTONschem Verhalten.

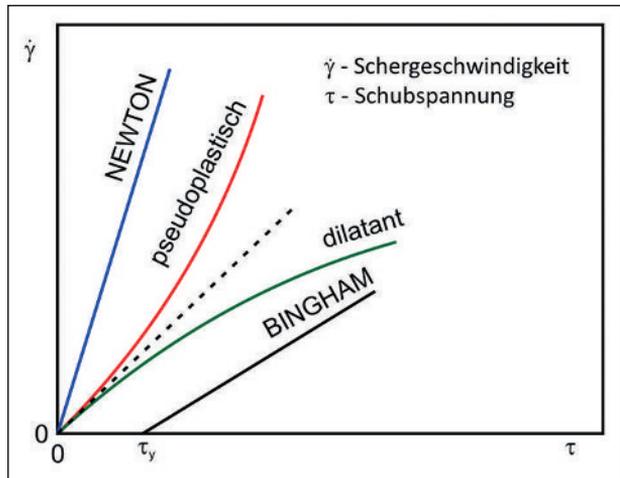


Bild 2 Fließkurven unterschiedlicher Fluide [5]

Wasser zeigt z.B. NEWTONsches Verhalten (Bild 2, blaue Linie), während sich Kunststoffschmelzen nichtlinear (strukturviskos) verhalten. Hier besteht keine direkte Proportionalität mehr zwischen Schubspannung und Schergeschwindigkeit, d.h. die Viskosität ist keine Konstante mehr. Die meisten Polymere verhalten sich im Schmelzzustand aufgrund ihres makromolekularen Charakters strukturviskos bzw. pseudoplastisch, d.h. mit ansteigender Schergeschwindigkeit verringert sich

die Viskosität kontinuierlich. Darüber hinaus hat die Zeit, d.h. die Beanspruchungsgeschwindigkeit, einen Einfluss auf das rheologische Verhalten. Es wird dabei zwischen thixotropem und rheopexem Verhalten unterschieden. Thixotropie und Rheopexie bezeichnen die Zeitabhängigkeit der Fließeigenschaften bei nicht-NEWTONschen Fluiden (Bild 3).

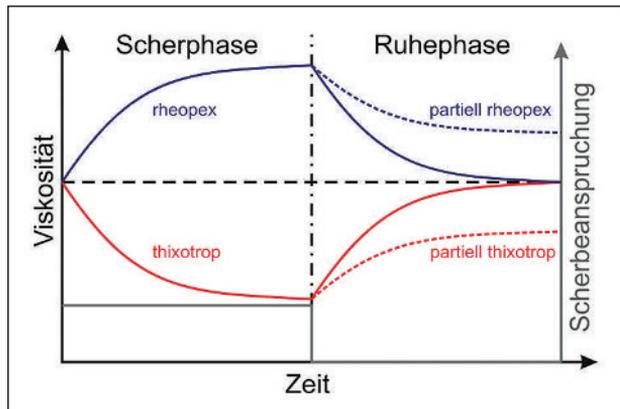


Bild 3 Thixotropes und rheopexes Verhalten von Fluiden (schematisch) [6]

Solche grundlegenden Zusammenhänge werden heute auch technisch zielgerichtet umgesetzt, wie dies das Beispiel der nichttropfenden Anstrich- oder Druckfarben zeigt, die ein ausgesprochen thixotropes Verhalten zeigen. Thixotrope Flüssigkeiten werden mit der Dauer ihrer Deformation dünnflüssiger, aber nach Wegnahme der mechanischen Beanspruchung wieder zähflüssiger. Einige Beispiele für thixotrope Fluide sind nachfolgend angeführt:

- feuchter Kaffeesatz,
- Synovial-Flüssigkeit in den Gelenken (vor sportlichen Betätigungen aufwärmen),
- Ketchup (Schütteln vor Ausgießen aus der Flasche),
- Druckfarben / Spritzlacke (bei Auftrag mit hoher Geschwindigkeit flüssig, in Ruhe zäh),
- Sand-Wasser-Gemische (Murenabgänge bei Starkregen),
- Lippenstift (leichter Auftrag, gute Haftung).

Rheopexes Verhalten kommt dagegen weniger vor. So zeigen z.B. Oxidsuspensionen, Seifen-

Solen, Ton-Wasser-Suspensionen sowie einige Polymethylacrylsäure-Wasser-Lösungen rheopexes Verhalten [7].

Die experimentelle Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Schubspannung und Schergeschwindigkeit, der das Fließverhalten einer Kunststoffschmelze beschreibt, kann mittels unterschiedlicher Versuchsanordnungen erfolgen, die jeweils den realen Beanspruchungsbedingungen nahe kommen oder die Materialspezifik des zu messenden Fluids berücksichtigen. Geräte, die die Fließeigenschaften von Fluiden messen, werden Rheometer genannt. Dabei werden in den unterschiedlichen Rheometern charakteristische Strömungen realisiert, die bei der Auswertung des Experimentes zugrunde zu legen sind. Prinzipiell unterscheidet man fünf verschiedene Arten von Fließvorgängen, die in Rheometern zur rheologischen Materialcharakterisierung genutzt werden (Bild 4).

Für die Kunststofftechnik stellt die Schmelzerheologie ein wichtiges Teilgebiet der Rheologie dar, wobei sowohl die durch Scherfließen

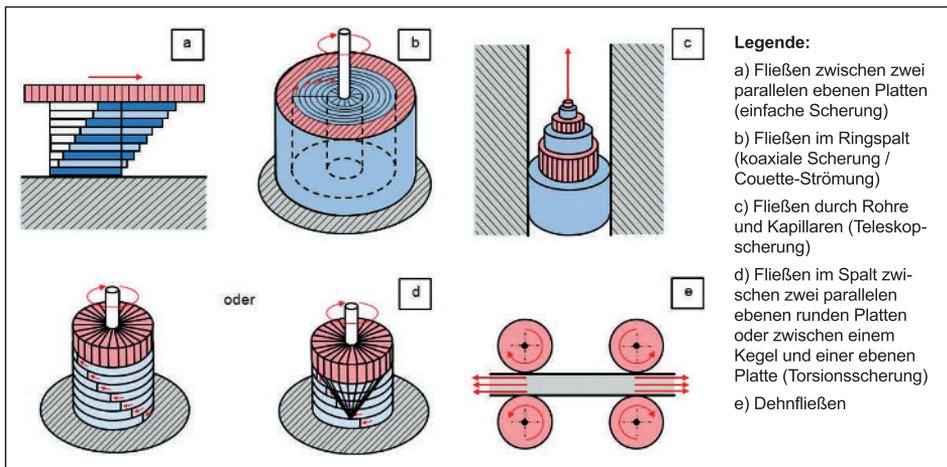


Bild 4 Arten von Fließvorgängen bei der rheologischen Materialcharakterisierung [8]

als auch durch Dehnfließen determinierten Prozesse relevant sind. In einem Extruder zur Herstellung von Rohren, Profilen, Platten oder Folien oder in Spritzgießautomaten zur Herstellung von Formteilen werden scherdominierte Strömungen gefunden, während bei vielen Extrusions-Nachfolgeprozessen (Faserspinnen, Folien-/Hohlkörperblasen, Tiefziehen oder Schäumen) stark dehndominierte Prozesse stattfinden. Geeignete Messverfahren der Rheometrie gewährleisten eine zuverlässige Bestimmung

des Fließverhaltens der unterschiedlichen Stoffe unter Einfluss von Belastung und Temperatur.

Die wichtigste Kenngröße zur Charakterisierung des rheologischen Verhaltens ist die Viskosität η (auch als dynamische oder kinematische Viskosität bezeichnet). Sie beschreibt die Fließfähigkeit oder das Fließverhalten von Flüssigkeiten bzw. Fluiden, d. h. den inneren Widerstand gegen eine von außen wirkende Beanspruchung. Je kleiner die Viskosität, umso dünnflüssiger, d. h. fließfähiger ist das Fluid. Bei Polymerschmelzen ist die Viskosität keine Konstante, da sie von der Temperatur und der Beanspruchungsgeschwindigkeit (Deformationsrate) abhängt. Das Bild 5 zeigt ein Beispiel einer Fließkurve (Scherfließen) für einen thermoplastischen Kunststoff und die daraus ermittelte Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit [9].

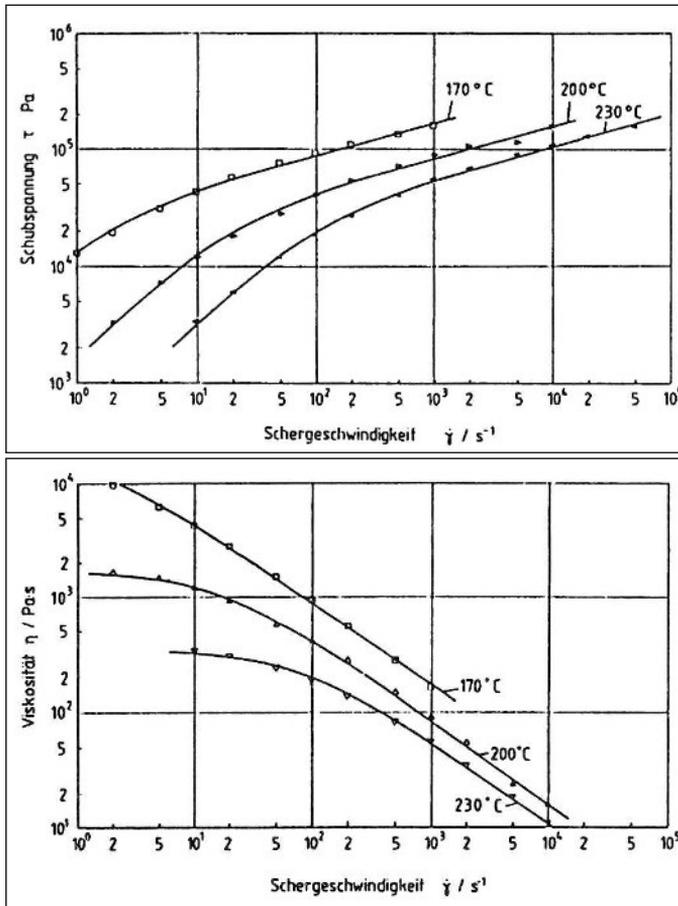


Bild 5
Typische Fließkurven für ein Polystyren bei unterschiedlichen Temperaturen (oben) und Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit (unten), nach [9]

Scherviskosität (η_s , s: “shear” – “scheren”) und Dehnviskosität (η_e , e: “elongation” – “strecken, dehnen”) werden als Funktion der Scher- bzw. Dehngeschwindigkeit mittels verschiedener Verfahren gemessen. Am häufigsten kommen Kapillarrheometer und Rotationsrheometer für die Charakterisierung der Scherviskosität zum Einsatz, während zur Bestimmung der Dehnviskosität sogenannte Dehnrheometer verwendet werden. Das Ziel rheometrischer Untersuchungen ist immer die Bestimmung relevanter Stoffdaten, die zur Auslegung des Fertigungsprozesses und zur Gewährleistung einer hohen Produktqualität erforderlich sind. Im Folgenden sollen einige Beispiele aus dem Bereich der Polymerwerkstoffentwicklung demonstrieren, welchen wichtigen Beitrag die Rheologie zur Entwicklung moderner leistungsfähiger Polymerwerkstoffe liefern kann.

Angewandte Rheologie bei der Polymerwerkstoffentwicklung

Rheologische Untersuchungen zur Entwicklung von Cellulose basierten Kunststoff-Schaumstoffen

Plastifizierung von Celluloseacetat

Cellulose ist ein aus Holz gewonnener nachwachsender Rohstoff, der schon vor ca. 150 Jahren benutzt wurde, um daraus Kunststoffe herzustellen. Dabei war es erforderlich, die Cellulose chemisch so aufzubereiten, dass verarbeitungsfähige Formmassen entstanden, aus denen Produkte mit anwendungsspezifischen Eigenschaften hergestellt werden konnten. “Zelluloid”, “Cellophan”, “Viskosefaser” oder “Celluloseacetat” sind Begriffe, die diese Cellulose basierten Kunststoffe beschreiben und allgemein bekannt sind. Heute erfährt die Cellulose als nachwachsender Rohstoff und speziell als Basis für Kunststoffe eine bemerkenswerte Renaissance [10]. So befassen sich z.B. aktuelle Arbeiten mit der Möglichkeit, Kunststoff-Schaumstoffe aus diesem biobasierten Material herzustellen, um Alternativen zu den gegenwärtig in hohem Umfang produzierten und eingesetzten Schaumstoffen auf Erdölbasis (vor allem Polystyren basierte Schaumstoffe) aufzuzeigen [11-14]. Die stoffliche Beschaffenheit von Cellulose bzw. des daraus hergestellten Kunststoffs Celluloseacetat (CA), das durch hohe molekulare Wechselwirkungen infolge einer hohen Polarität der Moleküle und einer bei Raumtemperatur vorliegenden hohen Steifigkeit bzw. Sprödigkeit, aber auch durch hohe Festigkeit gekennzeichnet ist, erfordert eine Weichmachung von CA mittels plastifizierender Stoffe, den sogenannten äußeren Weichmachern. Dadurch wird eine sichere thermoplastische Verarbeitbarkeit, bzw. im vorliegenden Fall, eine Schaumstoffherstellung über die CA-

Schmelze erreicht. Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit können rheologische Kennwerte bzw. Kennwertfunktionen herangezogen werden. Hierzu eignen sich Fließkurven entsprechend Bild 5, die den Zusammenhang zwischen der einwirkenden Schubspannung und der Schergeschwindigkeit beschreiben und aus denen die Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit bestimmt werden kann. Fließkurven von Polymerschmelzen in Schergeschwindigkeitsbereichen, die für die Kunststoffverarbeitung relevant sind, können mittels Hochdruck-Kapillarrheometern (HKR) oder Kegel-Platte- bzw. Platte-Platte-Rheometern aufgenommen werden (Bild 6).

Für ein Celluloseacetat sind solche Fließkurven, die mittels GÖTTERT Hochdruck-Kapillarrheometer Rheograph 2002 bzw. Kegel-Platte-Rheometer (TA Instruments) aufgenommen wurden [11], bei Anwendung unterschiedlicher Weichmacher und unterschiedlicher Weichmacherkonzentrationen im Bild 7 dargestellt.

Bei der Auswahl der Weichmacher spielt deren Mischbarkeit bzw. thermodynamische Verträglichkeit mit dem CA aber auch die Umweltverträglichkeit eine wichtige Rolle. In die Untersuchungen wurden die folgenden Weichmacher einbezogen: Glyceroltriacetat (GTA), Glyceroldiacetat (GDA), Triphenylphosphat (TPP), Diethylenglycoldibenzoat (DEGDB), Dipropylenglycoldibenzoat (DPGDB) und Triethyl-

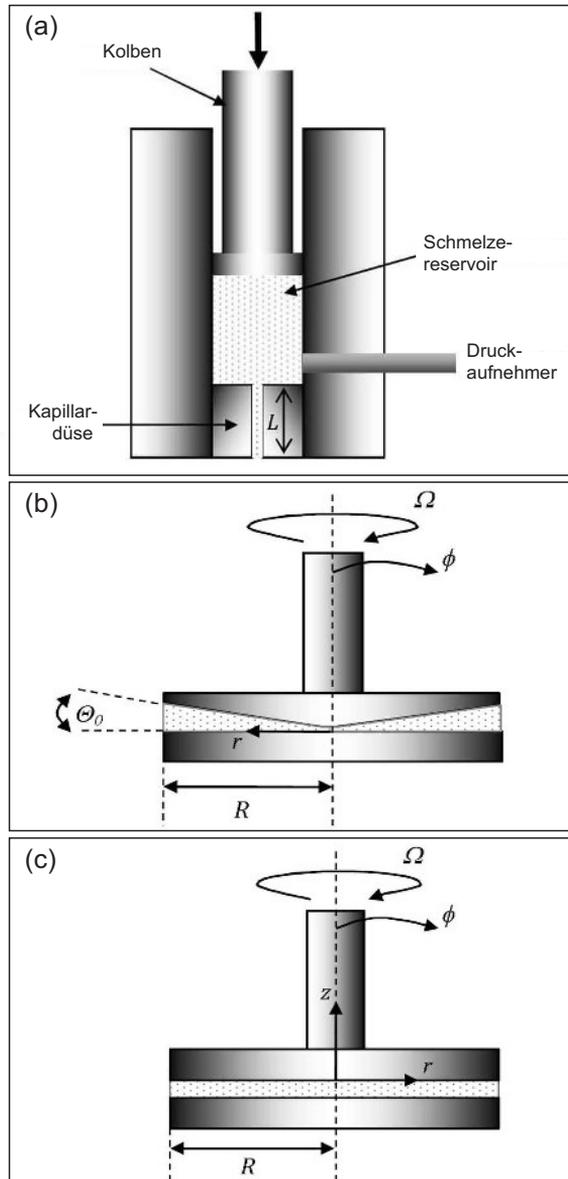


Bild 6 Hochdruck-Kapillarrheometer (HKR) (a) und Kegel-Platte- (b) bzw. Platte-Platte-Rheometer (c), schematisch, nach [15]

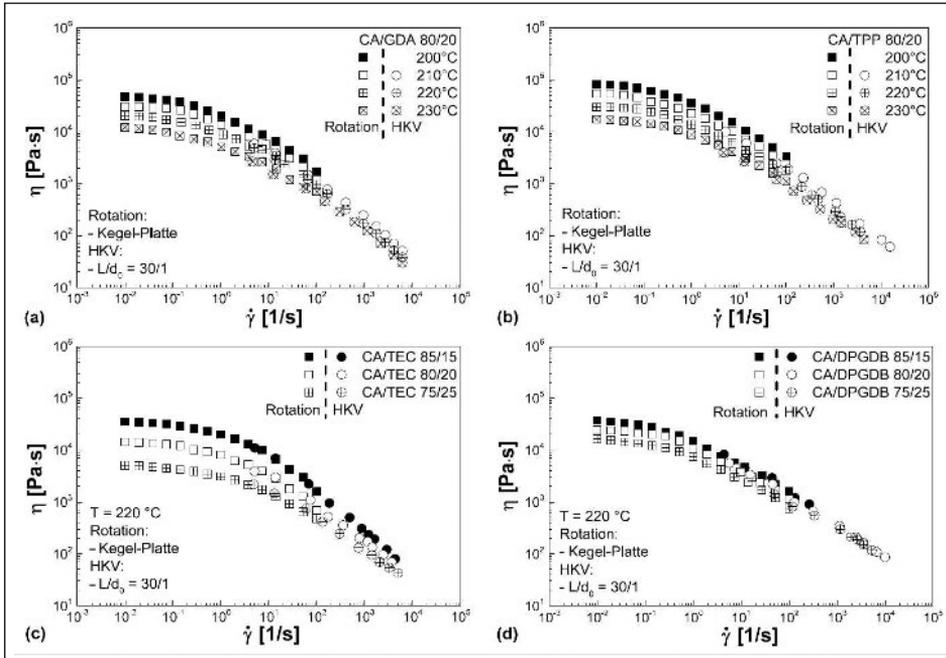


Bild 7 Viskosität von Weichmacher haltigem Celluloseacetat (CA) als Funktion von Weichmachertyp und -menge, Schergeschwindigkeit und Temperatur: (a) Glyceroldiacetat (GDA), 20 Masse %, (b) Triphenylphosphat (TPP), 20 Masse %, (c) Dipropylenglycoldibenzoat (DPGDB), 220 °C und (d) Triethylcitrat (TEC), 220 °C [11]

citrat (TEC). Von den einbezogenen Weichmachern zeichnete sich TEC infolge seiner biologischen Abbaubarkeit durch besondere Umweltfreundlichkeit aus.

Es wird deutlich, dass vor allem der Weichmachertyp die Intensität der Viskositätssenkung bestimmt, was vor allem auf die Wechselwirkungen zwischen CA und dem jeweiligen Weichmacher zurückzuführen ist. Hierbei spielt die chemische Struktur der Weichmachermoleküle eine entscheidende Rolle [16]. Das zeigt sich auch anhand der Untersuchung der Nullscherviskosität η_0 (Viskosität des Fluids unter dem Einfluss nach Null gehender Schergeschwindigkeit) des plastifizierten CA

in Abhängigkeit von Weichmachertyp und -menge (Bild 8). Ester mit linearer Molekülstruktur, z. B. TEGDA oder GTA (Vereinbarung der Kürzel siehe Seite 35), führen zu einer niedrigeren Nullscherviskosität des CA als Ester mit aromatischen Ringen, z. B. DEGDB oder TPP. Ferner münden weniger polare Ester in weichgemachte CA mit niedrigerer Nullscherviskosität als Ester mit höherer Polarität. GDA ist durch die freie OH-Gruppe polarer als GTA und kann über die OH-Gruppen Wasserstoffbrückenbindungen mit den OH-Gruppen des CA aufbauen, was die Beweglichkeit von GDA im CA einschränkt. Ähnliches gilt für TPP, das zudem durch die Phenylringe stärker sterisch gehindert ist. TEGDA oder GTA entfalten indes

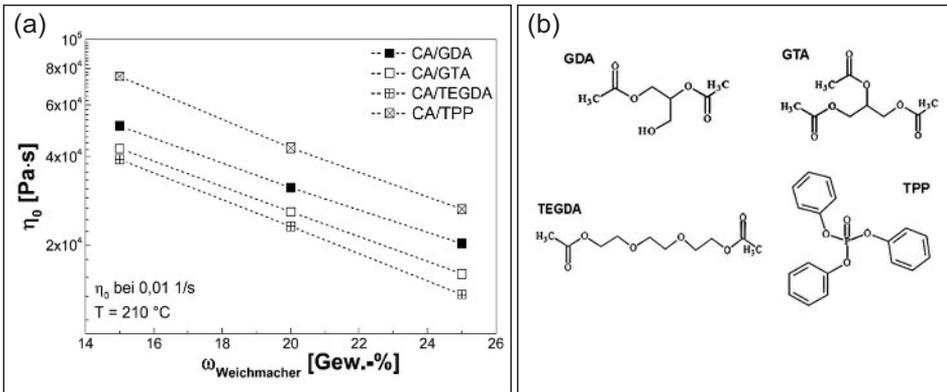


Bild 8 Nullscherviskosität η_0 unterschiedlich weichgemachter Celluloseacetate (CA) als Funktion der Weichmachermenge bei 210 °C (a) und chemische Struktur verwendeter Weichmacher (b) [11]

durch die unpolaren Kettenanteile starke Gleitwirkungen zwischen den CA-Ketten, was in weichgemachtem CA mit niedriger Viskosität resultiert.

Thermoplastisches Schäumen von Celluloseacetat

Bei der Herstellung von Schaumstoffen aus der thermoplastischen Schmelze mit Hilfe von geeigneten Treibmitteln laufen mehrere Mechanismen ab, die das Schäumungsverhalten,

die Schaumstruktur und die späteren Schaumstoffeigenschaften bestimmen (Bild 9).

Dies ist zunächst das Lösen und Homogenisieren eines Treibgases in der Schmelze, gefolgt von der Bildung von Blasenkeimen in der Thermoplastschmelze und schließlich die Formation von Blasen und die Fixierung dieser als Schaumstoffzellen. Bei der Blasenformierung muss die Schmelze eine hohe Festigkeit und gute Dehnfähigkeit aufweisen. Ist dies nicht gewährleistet, könnten die Zellwände während

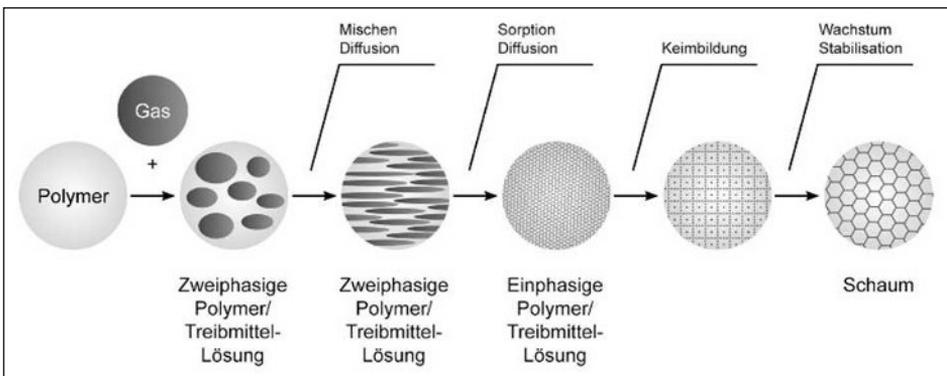


Bild 9 Verfahrensschritte der Schaumextrusion von Thermoplasten [11]

der Expansion aufreißen. Die Folge wären lokale Zellwanddurchbrüche, ein Kollabieren der Schaumstruktur, ein hoher Anteil offener Zellen im Schaum, eine inhomogene Morphologie und niedrige Expansionsgrade bzw. unerwünscht hohe Schaumdichten. Für eine homogene und feine Schaumstruktur ist daher die Schmelzrheologie von zentraler Bedeutung. Die Fließvorgänge innerhalb des Schmelzeaggregates, dem Extruder, sind durch die vorherrschenden Scherströmungen determiniert, so dass deren Beschreibung anhand der Scherviskositätsfunktion beschrieben werden kann. Demgegenüber laufen bei Einleitung des Schäumvorganges beim Austritt der treibmittelhaltigen Schmelze aus der Extruderdüse, d.h. der Bildung der Blasen, in den sich formierenden Zellwänden Dehnströmungen ab. Die Beschrei-

bung des rheologischen Verhaltens unter diesen Deformationsbedingungen muss anhand der Dehnviskosität erfolgen. Die Dehnviskosität ist heranzuziehen, wenn es sich um Deformationsprozesse in Dehnströmungen handelt, wie dies z.B. auch bei der Herstellung von Blasfolie nach Austritt der Schmelze aus der Düse und Aufblasen der Folie zu einem Folienschlauch oder der Generierung von Blasen beim Aufschäumen thermoplastischer Schmelzen der Fall ist. Darüber hinaus erfordert die Gewährleistung eines erfolgreichen Schäumvorganges, dass eine ausreichende Schmelzefestigkeit vorliegt. Die Schmelzefestigkeit kann mittels spezieller Methoden ermittelt werden, z.B. der Rheotens-Methode [17] (Bild 10). Ein Beispiel für Rheotens-Kurven von mit TEC weichgemachtem CA zeigt das Bild 11.

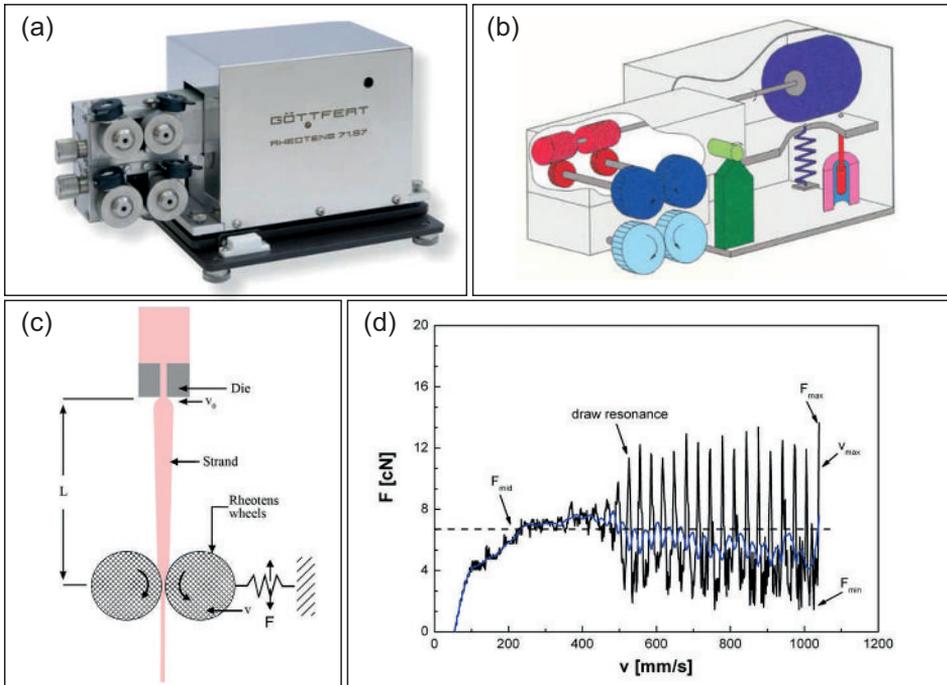


Bild 10 Rheotens-Dehnungstester für Polymerschmelzen (a, b) [17], Messprinzip und Datenauswertung (c, d) [18]

Für eine stabile Schaumbildung ist ein ausgeglichenes Verhältnis von Schmelzfestigkeit und Dehnfähigkeit der Schmelze wichtig. Dieses Verhältnis ist der Fläche unter der Rheotens-Kurve proportional. MALM et al. [19] haben hierfür eine Schäumfähigkeitszahl SZ aus dem Flächenintegral der Abzugsspannungs-Abzugsverhältnis-Kurven bestimmt. Je höher die Schäumfähigkeitszahl ist, desto besser ist das Schäumverhalten der Schmelze. Eine weitere Größe, die die Schaumbildung beurteilen kann, ist der spezifische mechanische Ener-

gieeintrag (SME), der den Massendurchsatz beim Rheotens-Versuch berücksichtigt. Für eine stabile Schaumbildung sollte die Polymer-schmelze eine hohe Energieaufnahmefähigkeit ohne Versagen (Schmelzebruch) aufweisen. Für einen gegebenen Massendurchsatz muss daher die Fläche unterhalb der Rheotens-Kurve maximiert werden. Wie ZEPNIK [20] gezeigt hat, nehmen sowohl die SZ als auch der SME mit steigender Weichmachermenge ab. Der Weichmachertyp bestimmt dabei das absolute Ausmaß der Absenkung. Zunehmende Weichmacherkonzentration im CA verbessert die Schmelzedehnfähigkeit, jedoch verringert sie die Schmelzefestigkeit deutlich.

Aus den rheologischen Daten, die mittels des Rheotens-Gerätes bestimmt werden, kann auch die Dehnviskosität η_e , die sowohl für die Strangstabilität als auch für eine homogene Schaumbildung von Bedeutung ist, ermittelt werden. Dazu wurden die Rheotens-Kurven, wie in Bild 11 dargestellt, zunächst unter

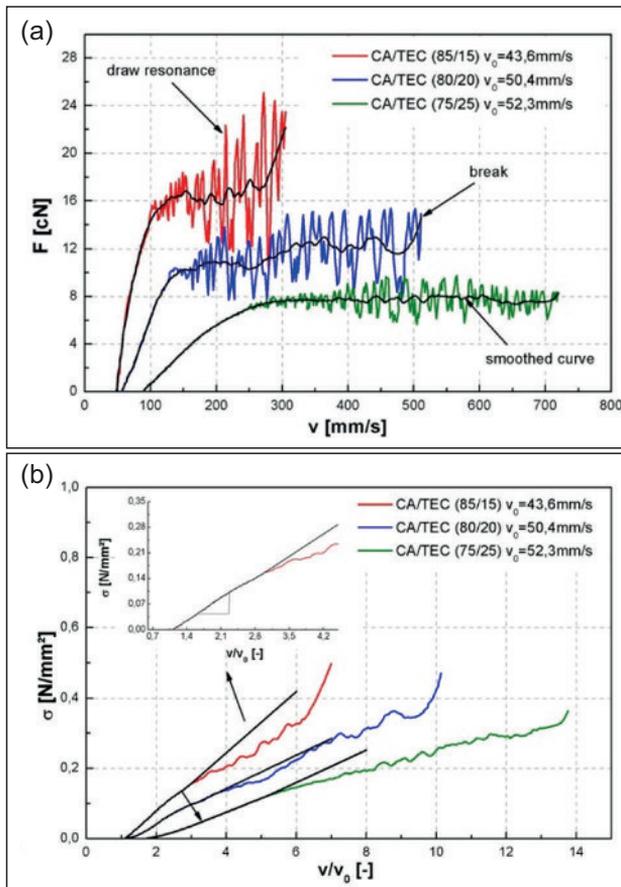


Bild 11
Rheotens-Kurven von weichgemachtem Celluloseacetat (CA) in Abhängigkeit von der Weichmachermenge am Beispiel von CA/ Triethylcitrat (TEC):
(a) Abzugskraft F als Funktion der Abzugsgeschwindigkeit v und
(b) Abzugsspannung σ als Funktion des Abzugsverhältnisses v/v_0 [18]

Nutzung des LEVENBERG-MARQUARDT-Algorithmus gefittet (angepasst). Die geglätteten Daten wurden dann zur Berechnung der scheinbaren Dehnviskosität η_e mit Hilfe eines von WAGNER [21] entwickelten analytischen Modells herangezogen. Bild 12 zeigt berechnete scheinbare Dehnviskositätsfunktionen als Funktion der Dehnrates in Abhängigkeit vom Weichmacheranteil für CA/TPP (Bild 12a)

und in Abhängigkeit vom Weichmachertyp bei einer Konzentration von 25 Gew.-% (Bild 12b).

Zunächst ist ein steter Anstieg der Dehnviskosität mit steigender Dehnrates bis zu einem Maximum festzustellen. Dieser Teil der Kurve charakterisiert die Dehnverfestigung der CA-Schmelze und entspricht dem Anfangsbereich der Rheotens-Kurve.

Nach Überschreiten des Maximums sinkt die Dehnviskosität kontinuierlich mit weiter steigender Dehnrates. Dieser Kurvenabschnitt beschreibt die Dehnentfestigung, die das Ergebnis einer voranschreitenden Entschlangung der CA-Ketten mit einhergehender Orientierung in Abzugsrichtung ist.

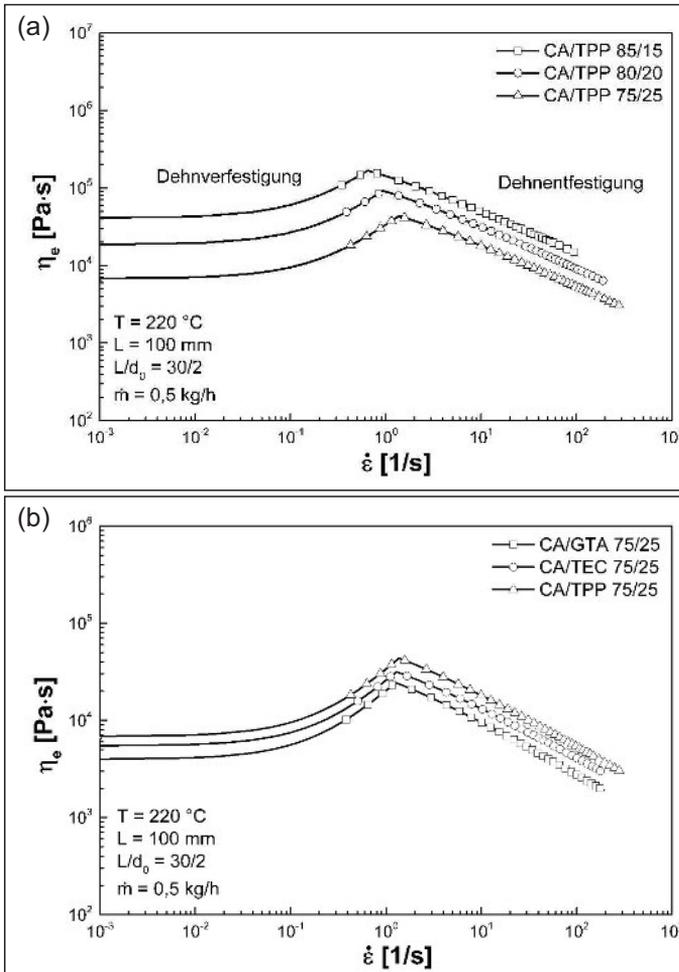


Bild 12
Scheinbare Dehnviskosität η_e von Weichmacher haltigem Celluloseacetate (CA) als Funktion der Dehnrates für (a) CA/Triphenylphosphat (TPP) in Abhängigkeit von der Weichmachermenge und für (b) CA/Glyceroltriacetat (GTA), CA/Triethylcitrat (TEC) und CA/TPP bei konstanter Weichmachermenge von 25 Masse % [11]

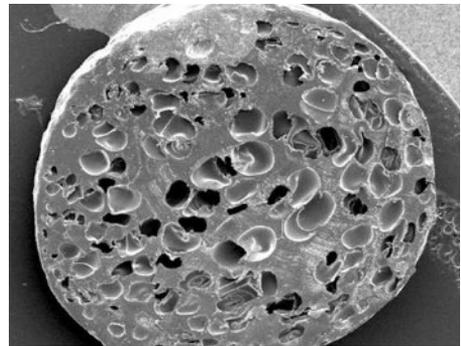
Generell zeigen die untersuchten weichgemachten CA-Schmelzen unter den gewählten Prüfbedingungen eine leichte Dehnverfestigung. Die Höhe und Lage bezogen auf die Dehnrate ist abhängig von der Weichmachermenge und dem Weichmachertyp. Ein steigender Weichmacheranteil führt stets zu einer Absenkung der Dehnviskosität.

Die durchgeführten rheologischen Untersuchungen zur äußeren Weichmachung und zum Schäumverhalten von CA zeigen anschaulich, dass über die Wahl des Weichmachertyps und über die Weichmachermenge gute Ausgangseigenschaften des CA für die thermoplastische Schaumextrusion erzielt werden können. Das Bild 13 zeigt Beispiele für schmelzeextrudierte CA-Schäume.

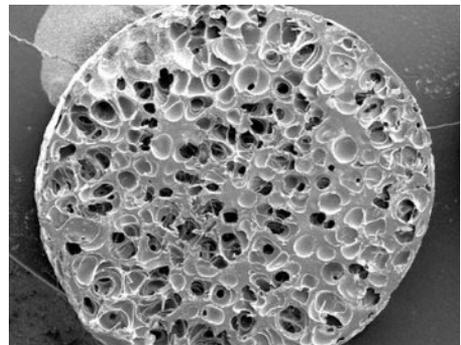
Es wird deutlich, dass sich die Schaumstruktur mit zunehmendem Gehalt an dem verwendeten chemischen Treibmittel Tracel® OBSH (p,p'-Oxybisbenzolsulfonylhydrazid) verfeinert, was auf die höhere Ausbeute an sich bildendem Treibgas zurückzuführen ist.

ZEPNIK [11] konnte schließlich auch zeigen, dass die Schaumfolienextrusion weichgemachter CA-Schmelzen auf industriellen Schaumextrusionsanlagen unter produktionsnahen Bedingungen erfolgreich realisiert werden kann (Bild 14). Die Umsetzung der auf Basis der rheologischen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der CA-Rezepturierung hinsichtlich Weichmacherart und -menge sowie Treibmittelart und -konzentration sowie bezüglich der technologischen Bedingungen gewährleisteten die erfolgreiche Herstellung von CA-Schäumen auf industriell relevanten Anlagen.

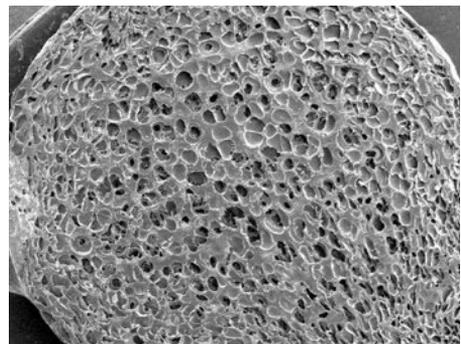
Die unter Verwendung des physikalisch wirkenden Treibmittels HFO 1234ze (1,3,3,3-Tetrafluorprop-1-en) hergestellten CA-



(a) 2 mm



(b) 2 mm



(c) 2 mm

Bild 13 Schaumstruktur von extrudiertem Celluloseacetat (CA)-Schäumen. 20 Masse % Weichmacher Glyceroltriacetat (GTA), Treibmittel Tracel® OBSH 0,5 % (a), 1,0 % (b) und 1,5 % (c) [11]

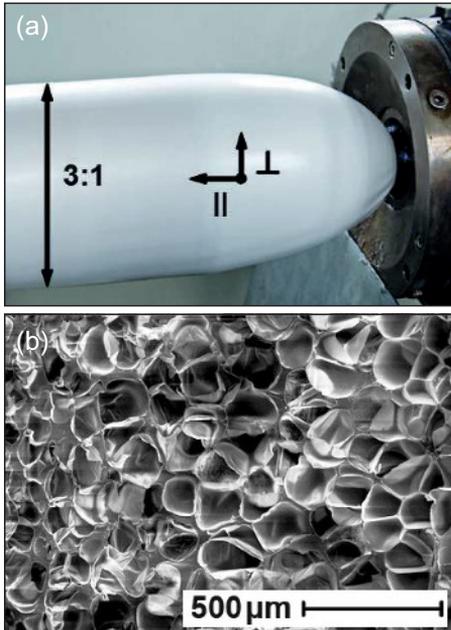


Bild 14 Schaumfolienextrusion von Celluloseacetat (CA)/Glyceroltriacetat (GTA) 80/20 (Aufblasverhältnis: 3:1) (a) und Rasterelektronenmikroskopie (REM)-Aufnahme von Schaumfolien aus CA/GTA 80/20 (Treibmittelsystem: 2 Masse % HFO 1234ze, 0,6 Masse % Talkum, 1 Masse % Ethanol) (b) [11]

Schaumfolien waren durch eine homogene Schaumstruktur und Feinzigeligkeit gekennzeichnet. Wesentliche physikalische und morphologische Eigenschaften dieser Schaumfolie entsprachen einer konventionellen mit Butan geschäumten Polystyren-Schaumfolie, so dass von einer biobasierten Alternative zu Polystyren für verschiedene thermoplastische Schaumanwendungen gesprochen werden kann.

Anwendung rheologischer Grundlagen zur kontrollierten Einstellung der Phasenmorphologie in Polymerblends

Polymerblends

Die Entwicklung neuer Polymerwerkstoffe ist heute dadurch gekennzeichnet, dass vorhandene Polymere entweder als Basis für Verbundwerkstoffe, auch Composites genannt, oder als Komponenten in Polymerblends eingesetzt werden. Zahlreiche Kunststoffanwendungen, die erfolgreich in unser tägliches Leben Einzug gehalten haben, sind keine singulären Polymere sondern Mischungen aus zwei oder auch mehreren polymeren Werkstoffen. So sind solche “Polymerblends” in Haushaltsgeräten, in technischen Elektrogeräten, in elektronischen Geräten, im Bereich der Medizintechnik oder im Automobil zu finden. So sind nicht nur Teile der Karosserie moderner PKWs sondern auch die Reifen aus Mischungen unterschiedlicher polymerer Komponenten hergestellt, was einzig und allein dem Ziel dient, positive Eigenschaften unterschiedlicher Komponenten in einem Werkstoff zu vereinen oder synergistische Eigenschaftseffekte zu erzeugen, die nur durch die Herausbildung spezieller Phasenmorphologien in den Blends möglich werden. Das zielgerichtete “Blenden” unterschiedlicher Polymerwerkstoffe folgt dabei thermodynamischen und rheologischen Regeln, die es erlauben, gewünschte Morphologie-Eigenschaftskorrelationen zu gewährleisten. Das Mischungsverhalten der polymeren Komponenten wird einerseits durch deren thermodynamische Verträglichkeit und andererseits durch deren rheologisches Verhalten zueinander im technologischen Mischprozess bestimmt.

Dabei ist davon auszugehen, dass technische Polymere aufgrund ihrer hohen Molmassen und daraus folgender geringen Mischungs-

triebe, thermodynamisch unverträglich, d.h. nicht molekular homogen mischbar sind. Damit ist primär das rheologische Verhalten der Polymerkomponenten beim Schmelzemischen für den phasenmorphologischen Zustand eines Polymerblends verantwortlich. Durch die Kontrolle des rheologischen Verhaltens der Komponenten zueinander im Mischprozess lassen sich Morphologietypen und damit anwendungstechnische Eigenschaften zielgerichtet beeinflussen.

Rheologische Grundlagen und Mikrorheologie von Polymerblends

Polymerblends können sowohl im Stadium der Synthese als auch in einem der Synthese nachgeschalteten Prozessschritt, der Compoundierung, hergestellt werden. Bei Ersterem spricht man von sogenannten Reaktorblends, bei denen die Einstellung der Phasenmorphologie der entstehenden heterogenen Blends durch kontrollierte molekulare Entmischung und Phasenbildung bzw. Phasenseparation realisiert wird [22-24]. Zahlreiche Anwendungen solcher Reaktorblends auf Basis Polypropylen, die vor allem auf die Optimierung des Verhältnisses zwischen Steifigkeit und Zähigkeit ausgerichtet sind, findet man z.B. im Automobil [25, 26] oder als flexible Kabelisolierungen [27].

Bei den durch Compoundierung über das Schmelzemischen hergestellten Polymerblends beeinflussen die thermischen und rheologischen Eigenschaften der Polymerkomponenten im Zusammenhang mit den technologischen Parametern des Schmelzemischaggregates, heute in der Regel Doppelschneckenextruder, das Mischergebnis und damit die Materialperformance [28-29]. Die Herausbildung einer bestimmten Morphologie in heterogenen Polymerblends wird durch die beim technologischen Mischprozess ablaufenden stofflichen Wechselwirkungen bestimmt, die sowohl

“enthalpischer” (Energieinhalt) als auch “entropischer” (Ordnungszustand) Natur sind. Diesen thermodynamischen Wechselwirkungen überlagert sind die jeweiligen rheologischen Eigenschaften der eingesetzten Komponenten, die primär den technologischen Mischprozess bestimmen [30]. Beim Schmelzemischen laufen zwei grundlegende Mechanismen ab, die die Mischungsqualität bestimmen: dispersive (Zerteilung) und distributive (Verteilung) Mischprozesse. Zu den dispersiven Mechanismen gehören die Desagglomeration und Destruktion, während die distributiven Prozesse durch Massekonvektion, Laminarkonvektion und Diffusion charakterisiert sind.

Hinsichtlich der Mechanismen der Morphologiebildung in Polymerblends sind bei Annahme der Existenz von Nichtmischbarkeit der Komponenten die rheologischen Prozesse dominant. Bei binären Polymersystemen bestimmt das Verhältnis der Schmelzeviskositäten sowie das Verhältnis der Schmelzeelastizitäten der Komponenten die resultierende Phasenmorphologie. Des weiteren spielt die Kapillarzahl als dimensionslose Kennzahl, die das Verhältnis von Viskositätskräften zu Oberflächenspannungen an den Phasengrenzen (Grenzflächen) von unmischbaren Flüssigkeiten wiedergibt, eine Rolle, da über diese Kennzahl die Zerteilmechanismen berücksichtigt werden können.

GRACE [31] hat die Beziehung zwischen Viskositätsverhältnis $\lambda_\eta = \eta_1/\eta_2$ und Kapillarzahl Ca in einem Diagramm dargestellt, welches die Zerteil- und Verteilmechanismen schmelzeförmiger Polymerkomponenten illustriert (Bild 15).

Die Darstellung in Bild 15 verdeutlicht, dass oberhalb eines Viskositätsverhältnisses von 2 bis 3 keine Tropfendispersion in Scherfließfeldern mehr erfolgt. Dagegen sind in Dehnströmungen eine weitere Deformation und auch die Zerteilung deformierter Tropfen möglich.

Anhand der Charakterisierung solcher Zusammenhänge auf Basis rheologischer Daten ist eine Abschätzung der unter bestimmten technologischen Bedingungen (Temperatur, Druck) ablaufenden Morphologiebildungsprozesse möglich. Alleine aus dem Viskositätsverhältnis der Komponenten lassen sich Schlussfolgerungen zur Deformationsfähigkeit disper-

ser Tropfen einer Komponente mit einer Viskosität η_1 in einer Matrix mit einer Viskosität η_2 ziehen, wie dies das Bild 16 verdeutlicht.

Mit zunehmender Scherung (Schubspannung τ) der Matrix werden die Tropfen entsprechend des vorliegenden Viskositätsverhältnisses λ_η deformiert. Bei niedriger Tropfenviskosität bzw. niedrigem Viskositätsverhältnis geht die Tropfendeformation leicht und intensiv von staten, was eine Voraussetzung für eine bei entsprechender Kapillarlzahl einsetzende Tropfenzerteilung und Wiederholung des Vorganges ist. Demgegenüber rotiert bei sehr hohem Viskositätsverhältnis der Tropfen nur im Scherfeld ohne deformiert zu werden. Feinteilige (niedriges Viskositätsverhältnis) bzw. grobdisperse (hohes Viskositätsverhältnis) Phasenmorphologien sind damit rheologisch determiniert.

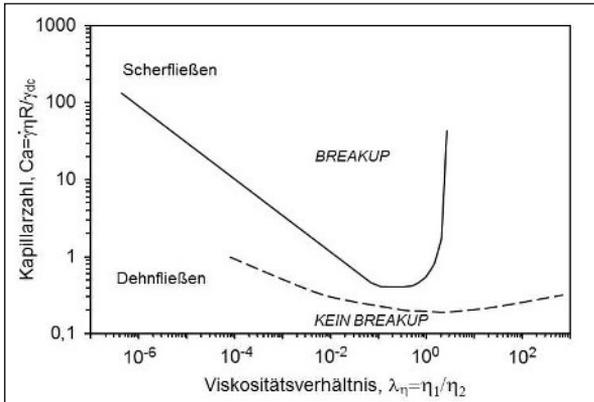


Bild 15 Abhängigkeit der Tropfendispersion vom Viskositätsverhältnis im einfachen Scherfeld und unter Dehnströmung, nach GRACE [31]

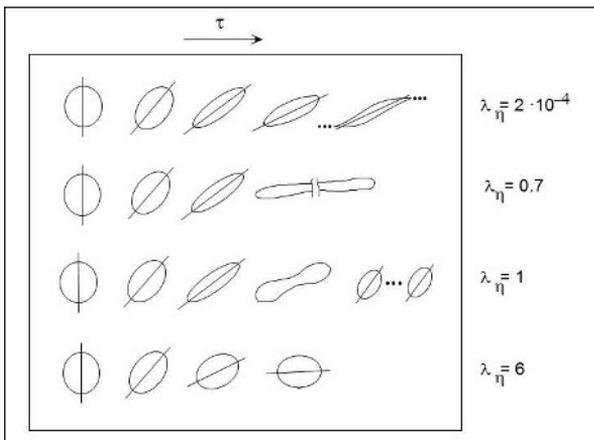


Bild 16 Zustände der Tropfendeformation im Scherfeld, nach RUMSCHEID [32]

Liegt ein Polymersystem vor, das durch ein geringes Viskositätsverhältnis und damit durch eine sehr hohe Deformation disperser Schmelzetropfen gekennzeichnet ist, stellt sich die Frage nach der Zerteilung solcher hochdeformierter Teilchen. ELMENDORP [33] hat anschaulich beschrieben, dass die Zerteilung langer, deformierter Fibrillen in polymerer Matrix durch einen rheologisch determinierten Wellenbildungsmechanismus erfolgt (Bild 17).

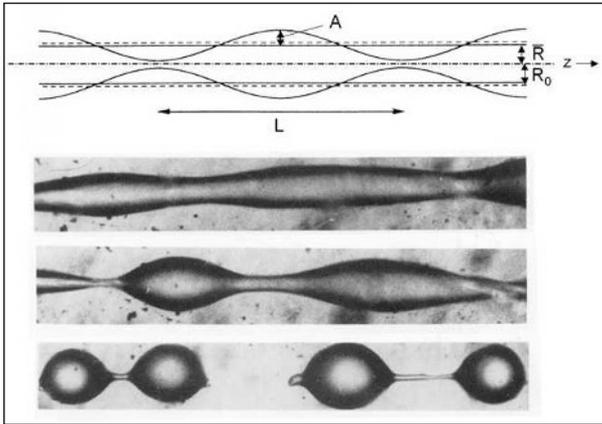


Bild 17
Schema der Wellenbildung und
Bruch deformierter Fibrillen (oben)
und Beispiel der Tröpfchenformie-
rung in einem Polyamid (PA 6)-
Polyethylen (PE)-Blend mit PE als
Matrix (unten) [33]

Im Folgenden sollen einige Beispiele der Herstellung von Polymerblends über Schmelzermischprozesse zeigen, welchen Einfluss die rheologischen Verhältnisse auf die Herausbildung der Phasenmorphologie von Blends aufweisen.

Rheologisch determinierte Morphologiebildung in Polymerblends

Beispiel 1: Polycarbonat (PC)/Polybutylen- terephthalat (PBT)-Blends

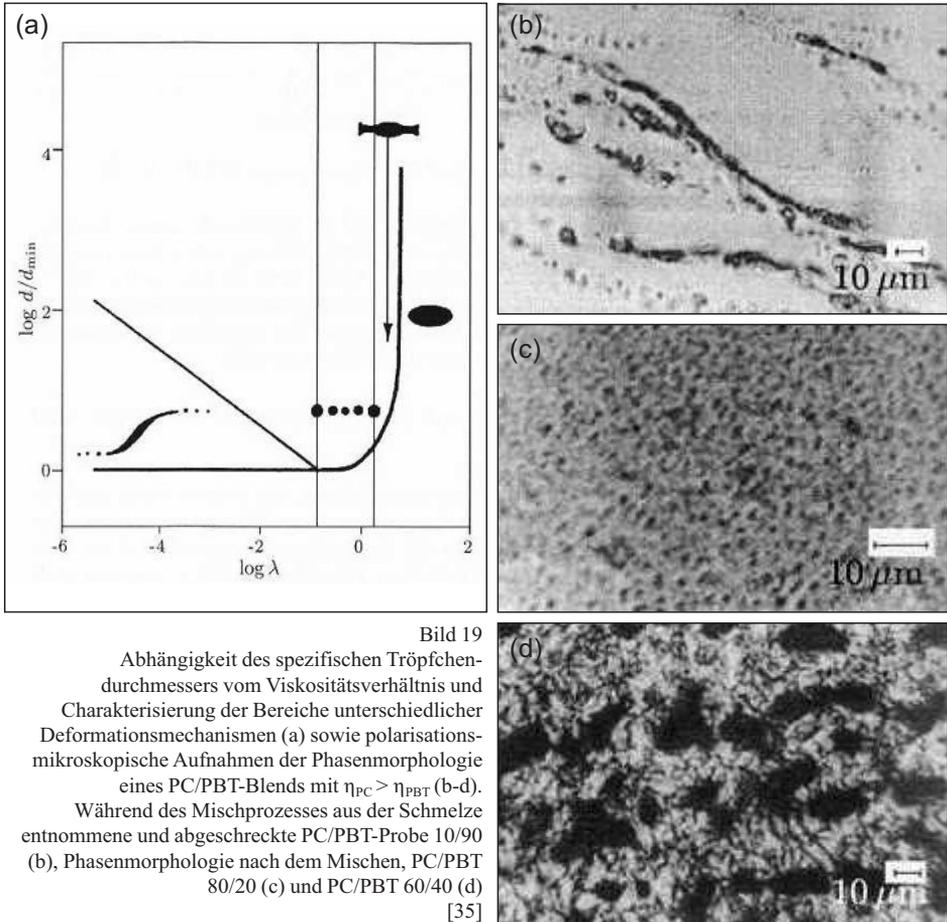
Blends aus technischen Kunststoffen erweitern die Palette der singulären technischen Kunststoffe in erheblichem Maße. Dazu gehört auch das Blend aus Polycarbonat (PC) und Polybutyleneterephthalat (PBT), das durch seine Kombination der Eigenschaften eine gute Wärmeform-, Chemikalien- und insbesondere Kraftstoffbeständigkeit (Spannungsrisssbeständigkeit), hohe Oberflächenqualität, ein sehr gutes

Zähigkeitsniveau und eine hervorragende Fließfähigkeit aufweist. Ein Beispiel für eine Anwendung des Blends aus PC und PBT zeigt das Bild 18.

PC/PBT-Blends wurden hinsichtlich ihrer Morphologiebildung beim Schmelzermischen untersucht [35]. Bei einer Mischungszusammensetzung mit geringem Anteil PBT in PC bilden sich während des Schmelzermischens aufgrund der niedrigeren Viskosität des PBT lange Fibrillen (Bild 19a), die aufgrund des im Bild 17 gezeigten Wellenbildungsmechanismus (Bild 19a) zu einzelnen feinen Tröpfchen zerfallen (Bild 19b). Damit wird die Basis für



Bild 18
Mercedes SLK Überrollbügel aus dem
PC/PBT-Blend "Romiloy 5730/01" [34]



eine feindisperse Phasenmorphologie gelegt, die schließlich durch Abkühlung fixiert wird (Bild 19c). Höhere Anteile der dispersen Phase bilden durch Koaleszenz dispergierter Teilchen eine grobdisperse Phasenmorphologie (Bild 19d).

Beispiel 2: Polypropylen(PP)/Polystyren (PS)-Blends

Polypropylen (PP) als kristallisationsfähiges Polymer und Polystyren (PS) als amorphes Polymer sind aufgrund ihrer molekularen Struktur untereinander stark unverträgliche Polymere. Aufgrund seiner hohen Glasübergangstemperatur (100°C) und des daraus folgenden hohen Elastizitätsmoduls bei Raum-

temperatur ist PS jedoch ein interessanter Blendpartner für teilkristalline Polymere, wie z.B. Polyethylen (PE) oder PP, die sich bei Raumtemperatur durch hohe Flexibilität und Zähigkeit auszeichnen.

Aufgrund der thermodynamischen Unverträglichkeit dieser Komponenten bilden sich je nach Viskositätsverhältnis im Schmelzemischprozess grob- bis feindisperse Phasenmorphologien aus. Das Bild 20 zeigt ein Beispiel einer aus 70 % PP und 30 % PS bestehenden Mischung. Das Viskositätsverhältnis zwischen den Komponenten η_{PS}/η_{PP} ist >1 , so dass im Resultat des Mischprozesses entsprechend den in den Bildern 15 und 16 dargestellten Mechanismen eine grobdisperse Phasenmorphologie entstanden ist.

Wie das Bild 20 verdeutlicht, liegen nahezu kugelförmige PS-Partikel in der PP-Matrix vor, die sich während des Schmelzemischprozesses gebildet haben und die bei der Abkühlung der Schmelze fixiert wurden. Es ist zu erkennen, dass die PS-Partikel keine Anbindung an die Matrix aufweisen, was auf die thermodynamische Unverträglichkeit dieser Komponenten zurückzuführen ist. Für die Nutzung eines solchen Systems ist daher der Einsatz von sogenannten Verträglichkeitsvermittlern bzw. Dispergatoren erforderlich, um eine intensivere Wechselwirkung zwischen den Komponenten zu erzielen bzw. eine feindispersere Phasenmorphologie zu erreichen. Ansätze dazu wurden z.B. durch Zusatz geeigneter Copolymere [37], niedermolekularer Substanzen [38] oder auch Nanoclay (z.B. das Schichtsilikat Montmorillonit) [39] vorgeschlagen.

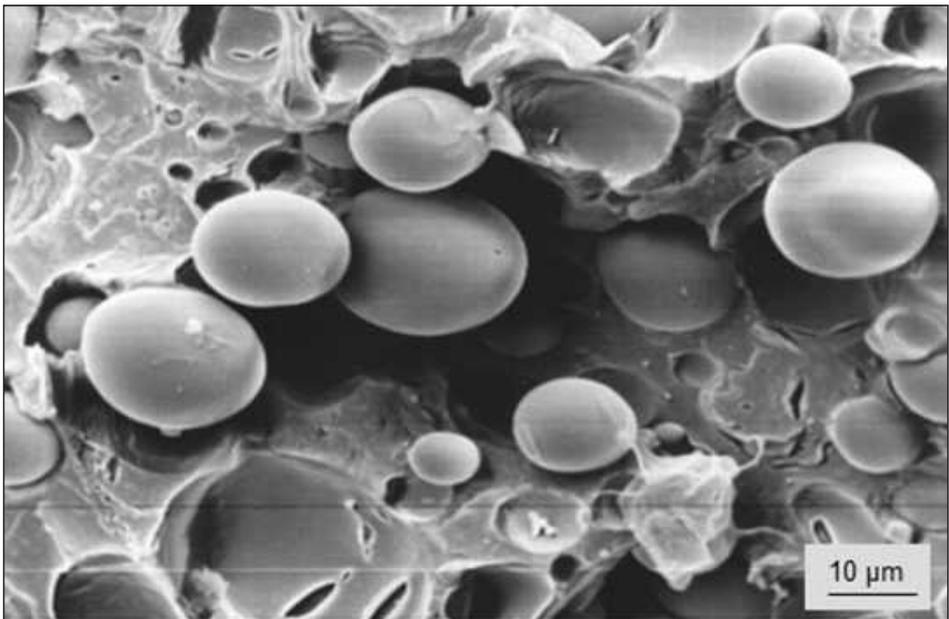


Bild 20 Rasterelektronenmikroskopische (REM)-Aufnahme der Phasenmorphologie eines PP/PS-70/30-Blends. Viskositätsverhältnis η_{PS}/η_{PP} ist >1 , Kryobruchfläche [28]

Im Bild 21a ist ein Erzeugnis aus einem mit Nanoclay modifizierten PP/PS-Blend dargestellt. Bei diesem Material ruft das eingesetzte Nanoclay aufgrund seiner verträglichkeitsvermittelnden Wirkung [40] und daraus folgender Verfeinerung der Phasenmorphologie (Bild 21 b), dem Anwachsen der spezifischen Grenzfläche und der Intensivierung der Phasenwechselwirkungen eine Verbesserung der anwendungstechnischen Eigenschaften hervor. Neben dem thermodynamisch determinierten Wechselwirkungseffekt hat auch die Veränderung der rheologischen Verhältnisse zwischen den Komponenten einen dispersionsfördernden Einfluss, da die durch Zusatz von Nanopartikeln ansteigende Viskosität der Schmelze eine Intensivierung der Scherdeformation und damit des Mischeffektes bewirkt.

Zusammenfassung

Wie die ausgewählten Beispiele zeigen, hat das rheologische Verhalten der Polymerwerkstoffe einen essentiellen Einfluss auf deren Eigenschaftsperformance. Dies ist vor allem deshalb der Fall, weil sowohl die vollsynthetischen als auch die biobasierten Polymerwerkstoffe in entsprechenden Aufbereitungsprozessen wie Weichmachung oder Blenden mit Zusatzkomponenten oder anderen Polymeren gemischt und damit an ein vorgesehenes Eigenschaftsspektrum angepasst werden müssen. Dies können sowohl die Verarbeitungseigenschaften, wie z.B. das Schäumen sein, oder auch die mechanischen Eigenschaften, wie optimierte Steifigkeits-Zähigkeits-Relationen. Somit kommt bei der Polymerwerkstoffentwicklung dem Verständnis und der gezielten Anwendung der rheologischen Prinzipien eine wichtige Rolle zu. Dabei ist die Rheometrie, die dem Kunststofftechniker die notwendigen rheologischen Daten für die Auslegung der technologischen Prozesse aber auch für die erforderlichen Werkstoffrezepturierungen liefert, mit ihren vielfältigen messtechnischen Möglichkeiten eine unverzichtbare Disziplin. ■

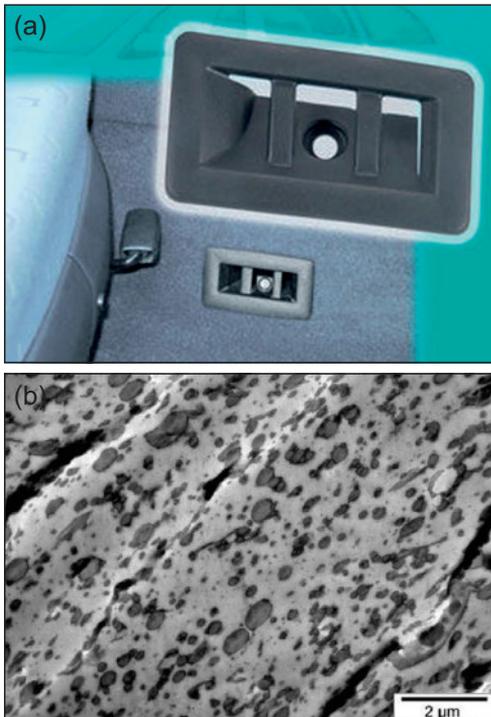


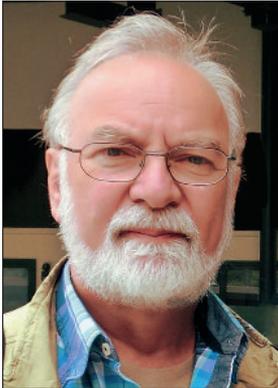
Bild 21
Nanoclay modifiziertes PP/PS-Blend: (a) Luftaustrittsblende für die Fußraumbelüftung im PKW, (b) Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme der Phasenmorphologie [39]

Literaturverzeichnis

- [1] DIETZ, K.-M.: "Heraklit von Ephesus und die Entwicklung der Individualität", Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart 2004, S. 60
- [2] DORAISWAMY, D.: "The Origins of Rheology: A Short Historical Excursion", in: The Society of Rheology (Hrsg.): *Rheology Bulletin*. **71** (2002) 2, 2
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Rheologie>, 27.9.2017 19
- [4] <http://polares-allerlei.blogspot.de/2010/11/auslaufuehren.html>, 27.9.2017
- [5] RADUSCH, H.-J.: "Bestimmung verarbeitungsrelevanter Eigenschaften", in: GRELLMANN, W.; SEIDLER, S. (Hrsg.): *Kunststoffprüfung*. Carl Hanser Verlag, München (2015) 3. Auflage, S. 43
- [6] SPURA, D.: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20075820>, CC BY-SA 3.0, 27.9.2017
- [7] <http://www.chemgapedia.de/.../rheologie2.vscml.html>, 27.9.2017
- [8] <http://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Rheometrie>, 27.9.2017
- [9] PAHL, M.; GLEISSLE, W.; LAUN, H.-M.: "Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere", VDI-Verlag, Düsseldorf 1995
- [10] GANSTER, J.; FINK, H.-P.: "Cellulose and Cellulose Acetate", in: *Bio-Based Plastics: Materials and Applications* (ed. S. KABASCI), John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2013
- [11] ZEPNIK, S.: "Untersuchungen zur Weichmachung und Verschäumung von thermoplastischen Celluloseestern", Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 2015
- [12] ZEPNIK, S.; HENDRIKS, S.; KABASCI, S.; RADUSCH, H.-J.: "Foam extrusion behavior, morphology and physical foam properties of organic cellulose ester", *J. Mat. Res.* **28** (2013) 17, 2394
- [13] ZEPNIK, S.; KABASCI, S.; RADUSCH, H.-J.; WODKE, T.: "Influence of external plasticization on rheological and thermal properties of cellulose acetate with respect to its foamability", *J. Mater. Sci. Eng. A*. **2**: (2012) 152
- [14] ZEPNIK, S.; KABASCI, S.; RADUSCH, H.-J.: "Influence of melt rheology on foam extrusion behavior of externally plasticized cellulose acetate", in: *Konferenzbeiträge zur Internationalen Wissenschaftlichen Tagung Polymertec'14*, 25.-27.6.2014, Merseburg, 736
- [15] AHO, J.: "Rheological characterization of polymer melts in shear and extension: Measurement reliability and data for practical processing", PhD Thesis, Tampere University of Technology, Tampere 2011
- [16] GARCIA, J. C.; MARCILLA, A. F.: "Rheological properties", in: Wypych, G., *Handbook of Plasticizers*, ChemTec Publishing, Toronto 2004, 223
- [17] Firmenschrift GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH
- [18] ZEPNIK, S.; KABASCI, S.; KOPITZKY, R.; RADUSCH, H.-J.; WODKE, T.: "Extensional Flow Properties of Externally Plasticized Cellulose Acetate: Influence of Plasticizer Content", *Polymers*, **5** (2013) 3, 873
- [19] MALM, B.; STADLBAUER, M.; FOLLAND, R.; DEMIN, P.: EP Patent 1816158 A1, "Extruded polyolefin for the manufacture of cellular material" (2007)
- [20] ZEPNIK, S.; HILDEBRAND, T.; KABASCI, S.; RADUSCH, H.-J.; WODKE, T.: "Cellulose acetate for thermoplastic foam extrusion", in: *Cellulose - Biomass Conversion*; VEN, T. VAN DE; KADLA, J. (Eds.), INTECH, 2013; Chapter 2, 17
- [21] WAGNER, M. H.; BASTIAN, H.; BERNNAT, A.; KURZBECK, S.; CHAIET, C. K.: "Determination of elongational viscosity of polymer melts by RME and Rheotens experiments", *Rheol. Acta*, **41** (2002) 4, 316
- [22] SCHWAGER, H.: "Polypropylen-Reaktorblends: Werkstoffe mit außergewöhnlicher Zähigkeit", *Kunststoffe*, **82** (1992) 6, 499

- [23] RADUSCH, H.-J.; DOSHEV, P.; LOHSE, G.: "Phase behavior and mechanical properties of heterophasic polypropylene-ethylene/propylene copolymer systems", *Polimery* **50** (2005) 4, 279
- [24] DOSHEV, P.; LACH, R.; LOHSE, G.; HEUVELSLAND, A.; GRELLMANN, W.; RADUSCH, H.-J.: "Fracture characteristics and deformation behavior of heterophasic ethylene-propylene copolymers as a function of the dispersed phase composition", *Polymer*, **46** (2005) 22, 9411
- [25] DOW Elastomers for Automotive TPO Compounds, Firmenschrift, The DOW Chemical Company, 2013
- [26] GRESTENBERGER, G.; POTTER, D. G.; GREIN, C.: "Polypropylene/ethylene-propylene rubber (PP/EPR) blends for the automotive industry: Basic correlations between EPR-design and shrinkage", *eXPRESS Polymer Letters* **8** (2014) 4, 282
- [27] KAMMEL, G.: Patent DE19503672, Mehradriges, kunststoffisoliertes Niederspannungs-Starkstromkabel, 1995
- [28] RADUSCH, H.-J.: "Morphology development during processing of recycled polymers", in: *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling*, AKOVALI, G.; BERNARDO, C. A.; LEIDNER, J.; UTRACKI, L. A.; XANTHOS, M. (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London 1998 / Springer Science and Business Dordrecht 1998, S. 191
- [29] RADUSCH, H.-J.; SAKAI, T.: "New insights into morphology development of nanofiller modified polymers and polymer blends by correlation of imaging methods and online measured electrical conductance (I) und (II)", *Plastics Age (Japan)*, (2011) 12, 78 und (2012) 1, 74
- [30] RADUSCH, H.-J.: "Phase Morphology of dynamically vulcanized thermoplastic elastomers", in: HARRATS, C.; THOMAS, S.; GROENINCKX, G. (Eds.), *Micro and Nanostructured Multiphase Polymer Blend Systems*, Marcel Decker, New York 2005, 295
- [31] GRACE, H. P.: "Dispersion phenomena in high viscosity immiscible fluid systems and application of static mixers as dispersion devices in such systems", *Chem. Eng. Commun.* **14** (1982), 3-6, 225
- [32] RUMSCHEID, F. D.; MASON, S. G.: "Particle motions in sheared suspensions XII. Deformation and burst of fluid drops in shear and hyperbolic flow", *J. Colloid Sci.* **16** (1961) 3, 238
- [33] ELMENDORP, J. J.: "A study on polymer blending microrheology", *J. Polym. Eng. Sci.* **26** (1986) 6, 418
- [34] "ROMIRA – eine echte Erfolgsgeschichte", Presseinformation Rowa Group Holding GmbH, 4.8.2014
- [35] RADUSCH, H.-J.; ANDROSCH, R.: "Poly (butylene terephthalate) blends", in: *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends and Composites*, Ed.: S. FAKIROV, Wiley VCH Weinheim Berlin 2002, S. 895
- [36] RADUSCH, H.-J.; DING, J.; AKOVALI, G.: "Compatibilization of heterogeneous polymer mixtures from the plastics waste streams", in: *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling*, AKOVALI, G.; BERNARDO, C. A.; LEIDNER, J.; UTRACKI, L. A.; XANTHOS, M. (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London 1998 / Springer Science and Business Dordrecht 1998, S. 153
- [37] RADUSCH, H.-J.; DING, J.; SCHULZ, M.: "Chemische Kopplung von Polystyren und Polybutadien in Schmelzemischungen mittels Sulfonylazid", *Die Angewandte Makromol. Chemie* **204** (1993) 177
- [38] DIAZ, M. F.; BARBOSA, S. E.; CAPIATI, N. J.: "Improvement of mechanical properties for PP/PS blends by in situ compatibilization", *Polymer* **46** (2005) 6096
- [39] GROSSMANN, J.; PUTSCH, P.: "(PS+PP) Blends: Besser verträglich", *Kunststoffe* **95** (2005) 9, 180
- [40] ALI, Z.; LE, H. H.; ILISCH, S.; THURN-ALBRECHT, T.; RADUSCH, H.-J.: "Morphology development and compatibilization effect in nanoclay filled rubber blends", *Polymer* **51** (2010) 20, 4580

Autorenvorstellung



Hans-Joachim RADUSCH

- 2.2.1949 geboren in Weißenfels
- 1967-72 Studium Verfahrenstechnik/Polymerwerkstofftechnik an der TH Leuna-Merseburg, Abschluss als Dipl.-Ing.
- 1975 Promotion zum Dr.-Ing. an der TH Leuna-Merseburg, Thema: “Beitrag zur mathematischen Modellierung und Simulation des Prozessablaufes im Plastizieraggregat eines Einschneckenextruders”
- 1985 Habilitation zum Dr. sc. techn. (1991 umgewandelt zum Dr.-Ing. habil.) an der Technischen Hochschule Leuna-Merseburg, Thema: “Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Herstellung, Morphologie und Eigenschaften von Polyethylenmischungen”
- 1974-77 Forschungsinstitut für Schuhtechnologie (FIS) Weißenfels
- 1977-85 Wissenschaftlicher Oberassistent, TH Leuna-Merseburg, Wissenschaftsbereich Polymerverarbeitung
- 1986 Hochschuldozent für Polymerverarbeitung, TH Leuna-Merseburg
- 1989 Berufung zum Ordentlichen Professor für Werkstofftechnik (Polymere), TH Leuna-Merseburg
- 1994 Berufung zum Universitätsprofessor für Kunststofftechnik, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachbereich Ingenieurwissenschaften
- 2007-13 Geschäftsführender Direktor des Kunststoff-Kompetenzzentrums Halle-Merseburg
- seit 2004 Representative of Germany of the Polymer Processing Society
- seit 2007 Mitglied der Akademie Mitteldeutsche Kunststoffinnovationen Merseburg
- 2011-16 Vizepräsident der Akademie Mitteldeutsche Kunststoffinnovationen Merseburg

“Das Zeitalter der Rheometrie eingeläutet” – Prof. h.c. Dr.-Ing. e.h. Otto GÖTTFERT †

Otto GÖTTFERT (* 25.7.1917 / † 28.4.2006, Bild 1), Maschinenbauer und erfolgreicher, sozial engagierter deutscher Unternehmer, gilt in Fachkreisen als Pionier der Rheologie [1-3]. Die Siebenbürgische Zeitung würdigte 1987 das Wirken des damals 70jährigen mit der Aussage, er habe “*das Zeitalter der Rheometrie eingeläutet*” [4].

Otto GÖTTFERT wurde am 25. Juli 1917 im bosnischen Tuzla, damals Österreichisch-Ungarische Monarchie, geboren. Nach Kriegsende kehrte er mit seinen Eltern nach Hermannstadt in Siebenbürgen zurück. Dort besuchte er Volksschule und Gymnasium (die “Bruken-thalschule”). An der “Gremial”-Handelsschule absolvierte er eine 3,5-jährige kaufmännische Lehre. Frühzeitig beschäftigte er sich mit technischen Fragen. Er arbeitete ein Jahr in einer Spinnerei. Doch sein Interesse galt der Technik. Der Obermeister STENZEL regte ihn dazu an, Maschinenbau zu studieren. Er nahm eine Praktikantenstelle in einer Maschinenfabrik an, wo man sich mit der Entwicklung von Press- und Luftwerkzeugen beschäftigte. Abends bereitete er sich in Vorstudienkursen (Mathematik und Physik) zielstrebig auf das Maschinenbaustudium vor. 1939 begann er ein Ingenieurstudium in Mittweida/Sachsen, wo zu dieser Zeit zahlreiche Ausländer und auch viele Siebenbürger studierten. 1943 schloss er das Maschinenbaustudium als Zweitbesten seines Jahrgangs ab.

Im Jahre 2002 benannte die Fachhochschul-Mittweida zu GÖTTFERTs Ehren einen Hörsaal nach ihm [2a].

Danach arbeitete er als junger Ingenieur auf den Gebieten der Werkstoffprüfung und Metallografie. Bis zur Demontage im Jahre 1946 war er als Planungsingenieur in der Mylauer Metallwarenfabrik tätig. Danach arbeitete er bis 1949 als Technischer Betriebsleiter in der Elektrotechnischen Fabrik K. H. KUBALD in Poggenburg bei Hannover. 1949-54 war er als Betriebsleiter in der Emmericher Maschinenfabrik an der Entwicklung von Federprüfmaschinen und Waagen beteiligt [2a, 6]. In dieser Zeit heiratete er seine Frau Doris, mit der er drei Kinder hat, einen Sohn, der heute seine Firma GÖTTFERT Werkzeug-Prüfmaschinen GmbH



Bild 1 Otto GÖTTFERT, September 1999 [5]

weiterführt, und zwei Töchter. Von 1955 bis Anfang der 1960er Jahre war Otto GÖTTFERT in der Firma Zwick-Werkstoffprüfung als Technischer Leiter (mit Einzelprokura) verantwortlich für die Entwicklung, Fertigung und Organisation der Produktion [2a, 6].

Nach diesem erfolgreichen und beachtenswerten Entwicklungsweg vom Kaufmann zum Maschinenbauingenieur und der Tätigkeit in leitenden Positionen wagte er 1962 den Sprung in die Selbstständigkeit. In Buchen im Odenwald/Baden-Württemberg gründete er die Firma GÖTTFERT-Feinwerktechnik GmbH und begann mit der Herstellung von rheologi-

schen Prüfgeräten in den Gebäuden einer alten Kettenmühle (Bild siehe Beitrag Axel GÖTTFERT) [2a, 6].

Otto GÖTTFERT hatte erkannt, dass die moderne Kunststofftechnik physikalisch exakte und zuverlässige Prüfverfahren und die dafür notwendigen Prüfmaschinen für Thermo- und Duroplaste sowie Kautschuk benötigte. Das waren die erkannte Marktlücke und sein Gründungsgedanke [2a]. GÖTTFERT's Unternehmensphilosophie "*Ein Höchstmaß an Technologie – beste Qualität und ein exzellenter Service*" ist bis heute die Grundlage des Erfolgs [3] (s.a. Beitrag Axel GÖTTFERT).

Seit 1978 trägt die Firma den Namen GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH. Die Anstrengungen in Forschung, Entwicklung und der Bau neuer Gerätetechnik führten dazu, dass im Laufe der Jahre ca. 30 Gerätetypen das Port-

folio der Firma ausmachten. 1985 erfolgten der endgültige Durchbruch und weitere Investitionen am Standort Buchen (Bilder siehe Beitrag Axel GÖTTFERT). Die Zahl der Mitarbeiter wuchs auf 130 an. 1989 wurde in Rock Hill in den USA auf eigenem Grundstück eine Vertriebsfirma eingerichtet [2a, 6].

1991 stiftete der Mittelständler GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH zur Förderung der Wissenschaft in den neuen Bundesländern 1,2 Mio. DM für die Einrichtung eines Rheologie-Laboratoriums an der Technischen Hochschule Merseburg mit leistungsfähiger Prüf- und Messtechnik für die technische Rheologie und die Kunststofftechnik. Das Labor wurde am 2.5.1991 in Anwesenheit von Otto GÖTTFERT feierlich eröffnet (Bild 2) und machte die Hochschuleinrichtung auf diesem Wissenschaftsgebiet mit einem Schlag konkurrenzfähig [2b, 7].



Bild 2 Einweihung des Rheologie-Labors an der TH Merseburg, 2.5.1991
(Mitte links: Otto GÖTTFERT, Mitte rechts: Prof. Dr.-Ing. Ernst-Otto REHER) [5]

Zeitzeugen vorgestellt



Bild 3
Verleihung des Ehrentitels Dr.-
Ing. e.h. an Otto GÖTTFERT an
der TH Merseburg, Oktober
1991
(v.r.n.l.: Rektor Prof. Dr. Egon
FANGHÄNEL, Doris GÖTT-
FERT, Ehrendoktor Otto GÖTT-
FERT, Laudator Prof. Dr.-Ing.
Georg BRACK, Prof. Dr.-Ing.
Ernst-Otto REHER, Merseburgs
Bürgermeister Dipl.-Ing. Herwig
HÜBNER, Prof. Dr.-Ing. Wolf-
gang FRATZSCHER [5])

Im Oktober 1991 verlich die damalige Technische Hochschule Merseburg Otto GÖTTFERT auf Grund seiner wissenschaftlich-technischen und unternehmerischen Leistungen im Gerätebau den Ehrentitel Dr.-Ing. e.h. (Bild 3) [5,8].

Ab 1993 knüpfte Otto GÖTTFERT mit Unterstützung von Ernst-Otto REHER (s.a. "Zeitzeugen vorgestellt") Verbindungen zum altherwürdigen Technologischen Institut in St. Petersburg (Bild 4) [9a], pflegte eine mehr als fünfjährige Zusammenarbeit mit dem ältesten technologischen Institut Russlands und unterstützte auch dort die Wissenschaft durch eine Spende moderner

rheologischer Prüfgeräte [9b]. Im November 1997 erhielt er vom St. Petersburger Technologischen Institut (Technische Universität) in Anerkennung hervorragender wissenschaftlich-technischer Leistungen auf dem Gebiet der Rheologie von Polymeren und für die Entwicklung der internationalen Zusammenarbeit den Titel eines Ehrenprofessors (Prof. h.c.) [10].



Bild 4
Otto GÖTTFERT
trägt sich im Museum des Techno-
logischen Instituts in St. Peters-
burg ins Ehrenbuch ein,
um 1997 [9a]

In seiner Antrittsrede als Ehrenprofessor des St. Petersburger Technologischen Instituts legte er sein Credo als Unternehmer offen: *“Ein Unternehmer sollte, um es überspitzt auszudrücken, eine Mischung sein aus NAPOLEON, der für den Willen zum Erfolg steht, aus BISMARCK, dem eisernen Diplomaten, aus Mutter THERESA, die die soziale Verantwortung repräsentiert und schließlich aus BRECHT, der die Pflicht als oberstes Gebot und die Verpflichtung für das Ganze charakterisiert.”* Als den entscheidenden Aspekt der Erfolgsfaktoren seiner 35-jährigen Unternehmung formulierte der 80-jährige: *“Den persönlichen Glauben an den Erfolg des Vorhabens, die unerschütterliche Überzeugung, dass das Wollen mit einem Höchstmaß an Eigeninitiative letztlich zum Durchbruch führt.”* Und neben der Verantwortung des Unternehmers für ein Höchstmaß an Technologie, Qualität und Kundenorientierung betonte er immer wieder: *“Die soziale Verpflichtung des Unternehmers ist die wichtigste und eine der vornehmsten Aufgaben in der sozialen Marktwirtschaft.”* [6]

Der anerkannte Rheologe und zeitweilige Mitarbeiter in seiner Firma, Prof. Dr.-Ing. Ernst-Otto REHER, (s.a. *“Zeitzeugen vorgestellt”*) würdigte die Lebensleistung von Otto GÖTTFERT kurz vor seinem Tode am 28.4.2006 in dieser Heftreihe wie folgt: *“Diese Aufgaben der wissenschaftlich-technischen Untersuchungen im Gerätebau wurden von ihm in großer Breite und wissenschaftlicher Tiefe zur Rheometrie der Polymeren gelöst. Mit dieser entwickelten Technik konnten wesentliche Fortschritte in der Kunststofftechnik ... gelöst werden. ... Auf dem Weltmarkt ist die Firma GÖTTFERT in der Kapillarrheometrie, was Laborgeräte und Prozessrheometer betrifft, Marktführer. ... Otto GÖTTFERT handelte immer als Ingenieur und Unternehmer in sozialer Verantwortung. Seine größte Sorge war und ist immer, für den Erhalt und die Vermehrung von Arbeitsplätzen zu sorgen”* [2a]. ■

Ausgewählt und zusammengestellt von
Dr. Dieter SCHNURPFEIL

Literaturverzeichnis

- [1] www.wikipedia.org/wiki/Otto_Goettfert, 26.8.2017
- [2] Ernst-Otto REHER: *“Zum Lebensweg und Lebenswerk von Prof. h.c. Dr.-Ing. e.h. Otto GÖTTFERT”* (a), und *“Verarbeitungstechnik”* (b) in: Merseburger Beiträge zur Geschichte der chemischen Industrie Mitteldeutschlands – 50 Jahre Hochschule in Merseburg, 2. Auflage, Hrsg.: SCI, Merseburg 2006, a) S. 115, b) S. 102
- [3] KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, 50. Jg., 10/1997, S. 684
- [4] Siebenbürgische Ztg. **13** (1987), S. 6
- [5] Svetlana REHER: zur Verfügung gestellte Dokumente und Bilder aus dem Nachlass von Prof. Dr.-Ing. Ernst-Otto REHER
- [6] Otto GÖTTFERT: Lebenslauf, um 1995 [5]
- [7] TH Echo (Zeitschrift der Technischen Hochschule Merseburg), 27. Jg., Nr.7, 23.5.1991, S. 1+3
- [8] Georg BRACK: *“Laudatio anlässlich der Ehrenpromotion von Otto GÖTTFERT”* (a), und *“Dr.-Ing. e.h. Otto GÖTTFERT zur Verleihung der Ehrenpromotion”* (b) in: Merseburger Beiträge zur Geschichte der chemischen Industrie Mitteldeutschlands – 50 Jahre Hochschule in Merseburg, 2. Auflage, Hrsg.: SCI, Merseburg 2006, a) S. 107, b) S. 110
- [9] Anatoli Sergejevitsch DUDYREV: *“Das Technologische Institut – Erinnerungen eines Rektors”* (russ.), Verlag Amphora, Sankt Petersburg 2010, a) S. 352/353, b) S.368
- [10] Kunststoffe, **88** (1998) 3, S. 290

International anerkannter Rheologe – Prof. Dr. sc. techn. Dr. h.c. Ernst-Otto REHER †

Ernst-Otto REHER (*12.4.1936/ †18.11.2016, Bild 1), Wissenschaftler, Hochschullehrer und international anerkannter Rheologe, hat durch seine Tätigkeit an Hochschulen und in der Wirtschaft, als Autor von mehr als 200 Veröffentlichungen in Form von Fachbeiträgen, Monografien und Lehrbüchern sowie in 100 Patenten wesentlich zur Ausprägung und Profilierung dieses Fachgebietes und seiner Anwendungen in der Rheometrie und Verarbeitungstechnik beigetragen [1-9].

Ernst-Otto REHER wurde am 12. April 1936 in Güsten bei Bernburg an der Saale geboren. Nach der Schulausbildung erlernte er das Tischlerhandwerk. Als Arbeiterkind mit sehr guten schulischen Leistungen wurde er an die Arbeiter- und Bauern-Fakultät (ABF) in Halle/Saale delegiert, wo er sprachlich auf ein Studium in der Sowjetunion vorbereitet wurde und 1956 das Abitur ablegte [1-3].

1956 nahm er am traditionsreichen, damaligen Leningrader Technologischen Institut (LTI) in Leningrad, heute wieder St. Petersburg, in der Fachrichtung “Prozesse und Apparate der chemischen Technologie” (“Verfahrenstechnik”) ein Studium auf, das er 1961 als Diplom-Ingenieur abschloss. An dieser, 1828 gegründeten und eine der ältesten technischen Hochschulen Europas (Bild 2), lehrte im 19. Jh. auch

Dmitri Iwanowitsch MENDELEJEV, der Begründer des Periodensystems der Elemente [10]. Diese Einrichtung wurde für Ernst-Otto REHER zur Alma Mater, die ihn wissenschaftlich prägte und zu der er ein Leben lang wissenschaftliche und persönliche Verbindungen hielt [1,4]. Hier knüpfte der stets lebenslustige, wissensdurstige und kameradschaftliche junge Mann Freundschaften mit Kommilitonen, die ein Leben lang währten [2].

In dieser ersten Leningrader Zeit lernte Ernst-Otto REHER auch seine Frau Svetlana kennen. Sie hatte an der Universität Germanistik und Anglistik studiert und arbeitete danach als Deutschlehrerin. Das Paar heiratete 1960. Sie kam nach dem Studium mit ihm in die DDR und war hier als Sprachmittlerin und Russischlehrerin tätig. 1962 wurde ihr Sohn Ondré geboren (1-4).

Nach dem Studium trat Ernst-Otto REHER zunächst eine Tätigkeit in der VVB (Vereinigung Volkseigener Betriebe) Lacke und Farben in Berlin an. Aber sein Drang zur aktiven, universitären Forschung führte ihn bald wieder zurück ans LTI, wo er 1962 bei dem international bekannten Professor Pjotr Grigorjevitsch ROMANKOV in eine Aspirantur eintrat, die er 1965 mit der Promotion zum Thema: “Trocknung von Pasten im Wirbelschichttrockner” als Dr.-Ing. erfolgreich abschloss (Bild 3) [1,2, 4].



Bild 1 Ernst-Otto REHER,
Juni 2008 [4]

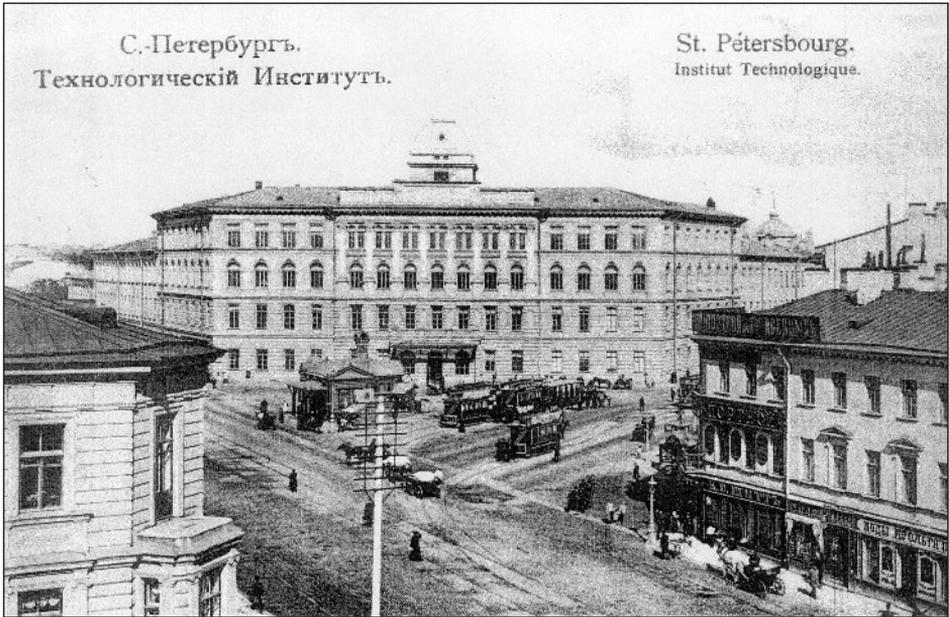


Bild 2 Blick auf das Hauptgebäude und den Komplex des St. Petersburger Technologischen Instituts im Zentrum der Stadt, wahrscheinlich um 1900 [4]

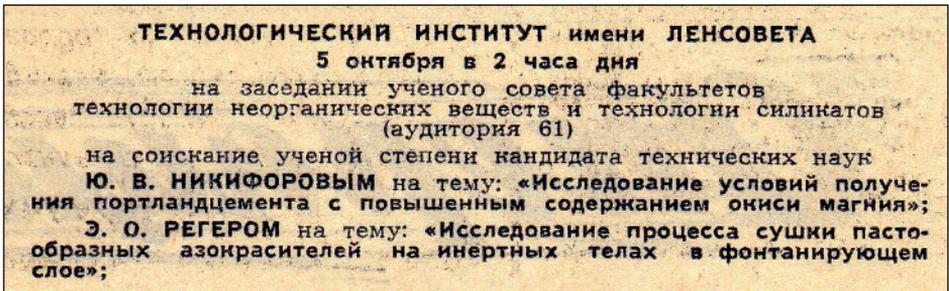


Bild 3 Ankündigung der Promotionsverteidigung von E.-O. REHER am LTI für den 5.10.1965 [4]

Nach seiner Rückkehr in die DDR 1965 nahm er an der Technischen Hochschule Leuna-Merseburg (THLM) am Institut für Verfahrenstechnik, Abteilung Mechanische Verfahrenstechnik noch in Halle am Neuwerk eine Tätigkeit als Oberassistent bei Prof. Dr. Wilhelm JUGEL auf. 1966 wurde die Mechanische Ver-

fahrenstechnik ein eigenes Institut und zog von Halle-Neuwerk in die neu erbauten Gebäude der THLM nach Merseburg (Bild 4). Er wandte sich wissenschaftlich aber nicht der Mechanischen Verfahrenstechnik zu, sondern der Verarbeitung von Kunststoffen, also den *nichthookeschen* und *nichtnewtonschen* Stoffen und deren

Zeitzeugen vorgestellt



Bild 4 Blick auf den Hochschulcampus der Hochschule Merseburg (HoMe), 2013 (links oben: das sanierte Hauptgebäude der HoMe, ehemals Chemiehauptgebäude der THLM, mit den Hörsälen 1-4, Mensa und Hochschulbibliothek, ehemals Hörsaal 5, Mitte: Flachbauten mit Versorgungseinrichtungen, rechte Seite: der Gebäudekomplex der Verfahrenstechnik, davor die Flachbauten des Verbindungsbau Ost, links oben am Verbindungsbau Ost der sanierte Hörsaaltrakt 6+7 und 8+9, rechte Ecke unten: die Hallen der Verfahrenstechnik mit den Verbindungsflachbauten West, Abriss demnächst vorgesehen [11], Mitte unten: Rechenzentrum und alte Mensa, letztere ebenfalls Abriss vorgesehen [11], außerhalb der rechten Bildkante befindet sich der Standort des Deutschen Chemie Museums, Blick von NW)



Bild 5 Im Gespräch: Prof. P. G. ROMANKOV (links) und Dr.-Ing. Ernst-Otto REHER am LTI, 1971 [4]

Charakterisierung, also der Rheologie und Rheometrie, einem noch jungen Wissenschaftsgebiet, das später auch als Verarbeitungstechnik bezeichnet wurde [1,3].

In den darauf folgenden Jahren während seiner Tätigkeit als Dozent an der Sektion Verfahrenstechnik der THLM erarbeitete Ernst-Otto REHER eine Dissertation B, die er mit Unterstützung und Konsultation seines ersten akademischen Lehrers, Prof. Pjotr G. ROMANKOV

(Bild 5), in einem Promotionsverfahren wiederum am LTI in Leningrad verteidigte (Dr. sc. techn., 1971 [1,3].

1972 wurde Ernst-Otto REHER als Ordentlicher Professor für Verfahrenstechnik (Technische Rheologie) berufen. In der folgenden, mehr als 20-jährigen Schaffensperiode an der THLM leitete er zeitweise den Bereich Verarbeitungstechnik und Mechanische Verfahrenstechnik (Bild 6) und übernahm darüber hinaus Leitungsverantwortung als Direktor der Sektion Verfahrenstechnik sowie der Sektion Werkstoff- und Verarbeitungstechnik nach deren Gründung am 1.9.1984 [1-3,7]. Ihm war in dieser Zeit auch der Aufbau eines Methodisch-

diagnostischen Zentrums (MDZ) Rheologie an der THLM übertragen worden.

Der damalige Leiter der Hauptforschungsrichtung Verfahrenstechnik, Prof. Dr. Wolfgang FRATZSCHER, schätzt das Wirken Ernst-Otto REHERs in dieser Zeit so ein: *“Er leistete eine umfangreiche und erfolgreiche Arbeit zur Herausbildung der Verarbeitungstechnik im Hochschulwesen der DDR als selbständiges Lehr- und Forschungsgebiet, das nicht nur in Merseburg sondern auch an anderen Hochschulen, insbesondere an der TU Dresden, wesentlich zur wissenschaftlichen Profilierung der jeweiligen Hochschule beitrug”* [3].



Bild 6 Mitarbeiterkollektiv des Bereiches Verarbeitungstechnik und Mechanische Verfahrenstechnik, September 1977 (v.l.n.r.: Laborantinnen Doris SCHRÖDER, Ingeborg BUCH, Martina BOCK, Elke FISTER, Ursula KRAUS, dahinter Assistentin Dipl.-Ing. Ulrike GERHARDT, Prof. Dr. Wolfgang BERGER, Leiter Prof. Dr. Ernst-Otto REHER, die Assistenten Dipl.-Ingenieure Manfred RICHTER, Stefan KRUG, Wolfgang BURGER, Rainer ASSMUS, Christian FRIEDRICH, Oberassistent Dr. Rainer SCHNABEL, Forschungsstudent Dipl.-Ing. Roland LIPP, Assistent Dipl.-Ing. Konrad MEISSNER, die Oberassistenten Dr. Bernd POLTERSODORF und Dr. Hans-Jürgen WIEMANN sowie der Bereichsingenieur Ing. Erhard PLIETZ, es fehlen: Sekretärin Cornelia WITTE, heute UHLEMANN, und Dipl.-Ing. Ralf SEEGER, Blick von SW, vgl. Bild 4) [4]

Zeitzeugen vorgestellt

Als ständiger Verbindungsmann der THLM zum LTI pflegte REHER die Beziehungen zum alt-ehrwürdigen Technologischen Institut (Bild 7). Er hielt dort jährlich Spezialvorlesungen über Polymerrheologie. Das LTI ernannte ihn im Jahre 1978 zum Ehrenprofessor und verlieh ihm 1984 die Ehrendoktorwürde [3].

Ende der 1970er/Anfang der 1980er Jahre strebte man in der DDR durch eine engere Verbindung von Wissenschaft und Wirtschaft eine Erhöhung der Effektivität und Leistungsfähigkeit der Volkswirtschaft an [3]. Auf Anforderung der Generaldirektorin des Fotochemischen Kombines ORWO Wolfen, Dr. Brunhild JÄGER, waren der Verfahrenstechniker und Rheologe Ernst-Otto REHER ebenso wie sein Kollege, der Chemiker Prof. Dr. Egon FANGHÄNEL, in den Jahren 1976/77 neben ihrer Tätigkeit als Hochschullehrer in Merseburg jeweils bis zu drei Tagen in der Woche in der Filmfabrik Wolfen tätig. In diese Zeit fiel

auch die Gründung der für ORWO arbeitenden und von ihr finanziell unterstützten Problemlaboratorien “Chemie der Informationsaufzeichnungsmaterialien (IAM)” (Leitung: Egon FANGHÄNEL) und “Technologie der IAM” (Leitung: Ernst-Otto REHER) an der THLM [1-3,7,12] (s.a. “Zeitzeugen berichten”). REHER selbst schrieb rückblickend im Jahre 2006 dazu: *“Mit diesen Einrichtungen wurde es möglich, sowohl verarbeitungstechnische Grundlagen zur rheologischen Stoffkennzeichnung, Prozessuntersuchungen, als auch angewandte Forschungsergebnisse für die Industrie”* zu erarbeiten bzw. durchzuführen [7].

Ab 1987 baute REHER an der THLM den vom Kombinat Carl Zeiss Jena initiierten und am 1.10.1987 gegründeten Sonderforschungsbereich “Polymere Werkstoffe” auf, dessen Ziel es war, polymere Verbundwerkstoffe und die dazugehörigen Verarbeitungsverfahren zu erforschen und zu entwickeln [1-3,7].



Bild 7
Eine Delegation der Merseburger Technischen Hochschule im Juni 1982 am LTI (v.l.n.r.: Egon FANGHÄNEL, Sektionsdirektor Chemie der THLM, Ernst-Otto REHER, L.N. MASH-LJAKOVSKI, THLM-Rektorin Margit T. RÄTZSCH, P.G, ROMANKOV, KALININ) [4]

Gegen Ende der DDR trat man auch an die Hochschulen heran, durch ihre Verbindungen zu Institutionen in westlichen Staaten mitzuhelfen, der DDR Devisen zuzuführen. REHER wurde aufgefordert, seine Erfahrungen aus der Geräteentwicklung für die Vermessung von rheologischen Systemen anzubieten. So kam die Verbindung zur Firma GÖTTFERT zustande [3] (s.a. Zeitzeugen vorgestellt – Otto GÖTTFERT). Die fruchtbare Zusammenarbeit und die mit der politischen Wende 1989/90 gegebenen Möglichkeiten führten dazu, dass die Firma

GÖTTFERT Werkstoff- und Prüfmaschinen GmbH 1991 der TH Merseburg moderne Prüf- und Messgeräte im Wert von 1,2 Mio. DM für ein Rheologie-Laboratorium zur Verfügung stellte, das es ermöglichte, konkurrenzfähig zu werden und neue Arbeitsfelder zu erschließen (Bilder 8 und 9) [3,4]. REHER selbst dazu später: *“Damit war die TH die bestausgerüstete*



Bild 8
Blick in das neu
errichtete Rheologie-
Labor an der TH
Merseburg, 1991 [4]

Unsere Hochschule erhielt leistungsfähige Technik

TH
echo

Gesamtwert 1200 000 DM

Am 02. Mai 1991 wurde an der Technischen Hochschule Merseburg das von der Firma Göttert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH gestiftete Rheologie-Laboratorium feierlich eröffnet. Mit der Firma Göttert ist die Hochschule schon über Jahre wissenschaftlich verbunden. Mit der nunmehr übergebenen Gerätetechnik im Wert von zirka 1,2 Millionen DM verfügt die Hochschule über eine leistungsfähige Meß- und Prüftechnik für die Technische Rheologie sowie Kunststofftechnik.

27.Jg./Nr.7 23.05.1991 0,30DM

Bild 9 Beitrag im TH Echo über die feierliche Eröffnung des von der GÖTTFERT Werkstoff- und Prüfmaschinen GmbH gestifteten Rheologie-Labors an der TH Merseburg, 23.5.1991 [4]

Zeitzeugen vorgestellt

Hochschule in Deutschland auf dem Gebiet der Rheologie und Verarbeitungstechnik von Polymeren” [7].

Nach der deutschen Wiedervereinigung im Jahre 1990 wurde die TH Merseburg schrittweise aufgelöst und nur einzelne Teile an die Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg angeschlossen. REHER beendete 1993 seine Tätigkeit an der TH Merseburg und wechselte danach in die freie Wirtschaft. Er trat 1993 als Leiter für Forschung und Entwicklung in die GÖTTFERT Werkstoff- und Prüfmaschinen GmbH in Buchen/Odenwald ein und konnte hier bis zum Eintritt in die Rente 1999 seine reichen theoretischen und praktischen Erfahrungen einbringen [1-3] (s. a. Zeitzeugen vorgestellt – Otto GÖTTFERT).

1999 wählte ihn die Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V. zu seinem Mitglied. In der Akademie wurde er Co-Vorsitzender des

Arbeitskreises Allgemeine Technologie, den er gemeinsam mit dem Präsidenten der Akademie, Prof. Dr. Gerhard BANSE, leitete. Anstoß zu diesem Arbeitsgebiet hatte er bereits in jungen Jahren erhalten, als er in einer Leningrader Bibliothek auf Arbeiten des Göttinger Professors Johann BECKMANN stieß. Bis zu seinem Tode am 18.11.2016 war er aktiv beteiligt an der Vorbereitung und Durchführung von sieben Symposien zu diesem Arbeitsgebiet und an der Publikation der Ergebnisse [1-3,5].

Ernst-Otto REHER pflegte auch nach seinem Ausscheiden aus der TH Merseburg in den 1990er und 2000er Jahren weiter seine engen Bindungen zum St. Petersburger Technologischen Institut (Technische Universität). Insbesondere mit Prof. Anatoli Sergejevitsh DUDYREV verband ihn bis zu seinem Lebensende eine enge Freundschaft, die der Rektor in seinen Memoiren ausführlich würdigte (Bilder 10 und 11) [6].



Bild 10 Anatoli S. DUDYREV und Ernst-Otto REHER in Halle-Neustadt, 1997 [4]



Bild 11
Ernst Otto REHER und Anatoli S. DUDYREV
auf dessen Datsche bei St. Petersburg,
wahrscheinlich um 2008
[6b]

Wolfgang FRATZSCHER würdigte Ernst-Otto REHER in seiner Trauerrede so: *“Sein wissenschaftliches Wirken hat Spuren hinterlassen. Die sind nicht nur zu finden in seinen zahlreichen Publikationen (mehr als 200) in denen er seine Erkenntnisse und Überlegungen zu seinen Fach- und Arbeitsgebieten niedergeschrieben hat, und ebenso nicht nur in den Messsystemen und -geräten, die nach seinen Vorschlägen gebaut worden sind und gebaut werden. Spuren sind wohl vor allem zu finden bei seinen Studenten (300 Diplomanden zum Dipl.-Ing. geführt [9]) und Mitarbeitern (30 Mitarbeiter zum Dr.-Ing. promoviert, davon haben sich 6 Wissenschaftler habilitiert zum Dr.-Ing. habil.*

bzw. Dr. sc. techn. [9]), die durch seine Hände gegangen und durch seine Persönlichkeit als Hochschullehrer geprägt worden sind” [3]. ■

Ausgewählt und zusammengestellt von
Dr. Dieter SCHNURPFEIL

Literaturverzeichnis

- [1] www.wikipedia.org/wiki/Ernst-Otto_Reher, 30.8.2017
- [2] Dieter SEELIGER: “Nekrolog auf unser Mitglied Prof. Dr. Ernst-Otto Reher”, <https://leibnizsozietat.de/nekrologe/...>, 2.12.2016
- [3] Wolfgang FRATZSCHER: Trauerrede, Stadtgottesacker Halle/Saale, 8.12.2016 [4]
- [4] Svetlana REHER: zur Verfügung gestellte Dokumente und Bilder aus dem Nachlass von Prof. Dr.-Ing. Ernst-Otto REHER
- [5] Gerhard BANSE: “Symposium Technologie und nachhaltige Entwicklung – Eröffnung und Laudatio”, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Band 130, Jg. 2017, S.21
- [6] Anatoli Sergejevitsch DUDYREV: “Das Technologische Institut – Erinnerungen eines Rektors” (russ.), Verlag Amphora, Sankt Petersburg 2010, a) S. 361 ff. b) S. 352/353 [4]
- [7] Ernst-Otto REHER: “Verarbeitungstechnik”, in: Merseburger Beiträge zur Geschichte der chemischen Industrie Mitteldeutschlands – 50 Jahre Hochschule in Merseburg, 2. Auflage, Hrsg.: SCI, Merseburg 2006, S. 102
- [8] Ernst-Otto REHER: “Verarbeitungstechnik”, in: “60 Jahre Hochschulcampus Merseburg”, Hrsg.: Hochschule Merseburg, 2014, S. 92
- [9] Ernst-Otto REHER: “Meine wissenschaftliche Tätigkeit in Lehre, Forschung und Industrie”, Manuskript, veröffentlicht in: “100 Jahre P.G. Romankow”, St. Petersburg, 2004 [4]
- [10] Jürgen DUNKEL, Dieter SCHNURPFEIL: “Ein ungewöhnlicher Streifzug durch das Periodensystem der Elemente”, Hochschulverlag Merseburg, Mai 2016
- [11] Robert BRIEST: “Abriss als Neuanfang”, Mitteldeutsche Zeitung (MZ), 7.9.2017, S.7
- [12] Egon FANGHÄNEL: persönliche Mitteilungen, 14.7. und 9.9.2017

Das Problemlabor “Technologie der Informationsaufzeichnungsmaterialien (IAM)”

Mitte der 1970er Jahre wurden in der DDR an den Hochschulen und Universitäten verstärkt “Sonderforschungsbereiche” und “Problemlaboratorien” gegründet, um das an den wissenschaftlichen Einrichtungen vorhandene Potential stärker für Fortschritte und Innovationen in Wirtschaft und Industrie nutzen zu können. Der Begriff “Problemlabor” steht für eine von der Industrie gestützte Forschungsgruppe an Hochschulen, das von einem renommierten Hochschullehrer geleitet wurde, auch Industriemitarbeiter beschäftigte und die Nähe zur universitären/Hochschulforschung nutzen konnte.

Vom Fotochemischen Kombinat (FCK) ORWO Wolfen (Bild 1) wurden die so genannten Problemlaboratorien “Chemie der Informationsaufzeichnungsmaterialien (IAM)”, und “Technologie der IAM” eingerichtet, finanziert

und unterstützt. Die Anforderung ging mit Nachdruck von der damaligen Generaldirektorin Dr. Brunhild JÄGER aus. Ab 1981 wurde die Arbeit dieser Laboratorien von ihr in enger Zusammenarbeit mit der Rektorin der Technischen Hochschule “Carl Schorlemmer” Leuna-Merseburg (THLM), Professorin Dr. Margit T. RÄTZSCH, durchgesetzt.

Die dafür notwendigen Räume wurden von der THLM zur Verfügung gestellt. Das Problemlabor “Chemie der IAM” leitete der Chemiker Prof. Dr. Egon FANGHÄNEL. Dafür wurde der ehemalige Vorbereitungsraum des Hörsaals 5 genutzt und der darüber liegende Seminarraum im Hörsaaltrakt des Chemiehauptgebäudes wurde umgebaut und hergerichtet (Lage siehe Bild 4 in “Zeitzeugen vorgestellt – Ernst-Otto REHER”). Es gab zwei Arbeitsgruppen, die sich mit der Entwicklung neuer Farbkuppler beschäftigten (Leitung: Prof. Dr. Egon FANGHÄNEL) und mit der Entwicklung von Gelatine-Ersatzstoffen (Leitung: Prof. Dr. Manfred RÄTZSCH) [2].

Das Problemlabor “Technologie der IAM” leitete der Verfahrenstechniker und Rheologe Prof. Dr.-Ing. Ernst-Otto REHER (s.a. “Zeitzeugen vorgestellt”). Diese Labore fanden ihren Platz in den Gebäuden der Verfahrenstechnik. Das Technikum war im



Bild 1

Verwaltungsgebäude 041 der Filmfabrik Wolfen, Sitz der Generaldirektion, ab 1964 anstelle AGFA- mit ORWO-Signet an der Fassade (unterhalb der Uhr, vgl. kleines Bild Umschlagseite vorn) [1]

Verbindungsbau West untergebracht (Lage siehe Bild 4 in “Zeitzeugen vorgestellt – Ernst-Otto REHER”) [2-4].

Günter MATTER, 1964-67 in der Filmfabrik Wolfen zum Mechaniker ausgebildet, 1967-71 an der THLM Verfahrenstechnik studiert, 1971 als Dipl.-Ing. abgeschlossen, 1978 Promotion zum Dr.-Ing., war bis 1978 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Industrieforschungsinstitut der Filmfabrik Wolfen an der THLM (Problemlabor “Technologie der IAM”) tätig. Er beschreibt die Anfänge so: *“Da mein Promotionsthema die Filmfabrik Wolfen betraf, wurden zu Beginn 1976 meine Räume (ein Labor und ein Technikumsraum) für den Aufbau des Problemlabors genutzt. Zu Beginn bearbeiteten wir ausschließlich trocknungstechnische Themen. Wir bauten mehrere Versuchsstände zur*

Beschichtung fotografischer Filme auf, die zur Trocknung der Filme und später zur Untersuchung von Beschichtungseinrichtungen genutzt wurden” [4].

Zu Beginn im Jahre 1976 bearbeitete man die Trocknung von Papieren im Hochfrequenz-trocknungs- (HFT) kanal [5]. Bild 2 zeigt die Versuchsanlage zur HF-Trocknung im Technikumsraum/Verbindungsbau West. Nach dem ersten Jahr ging 1977 die Leitung des Labors von Günter MATTER an Dr. Reinhard KÄRMER über. Die Arbeiten konzentrierten sich nun vorrangig auf rheologische Untersuchungen zur Beschichtung von Filmen (Bilder 3 und 4) [3,4,6].

Reinhard KÄRMER, 1966 Abitur mit Berufsausbildung als Maschinenbauer, 1966-70 Stu-

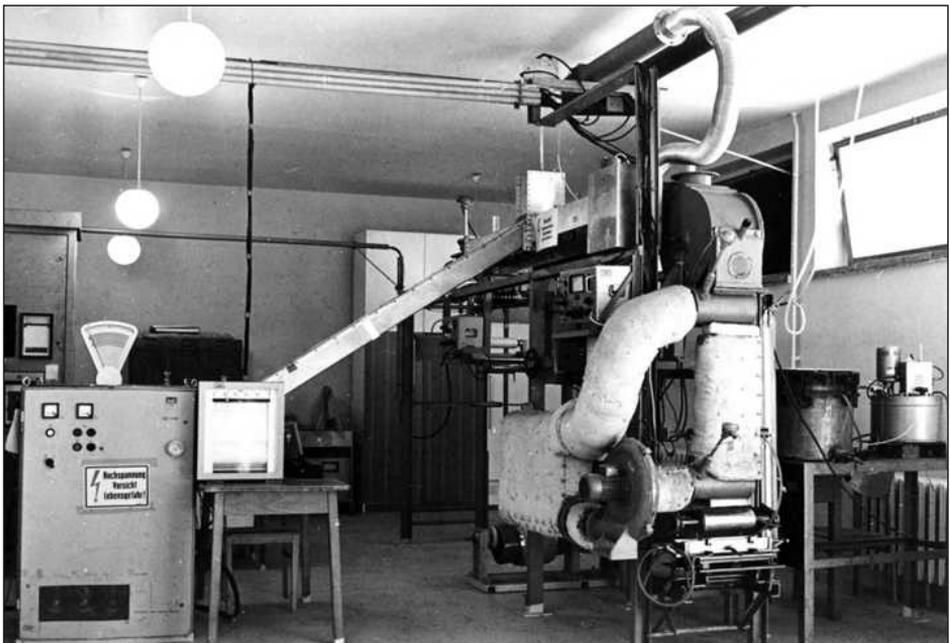


Bild 2 Versuchsanlage zur HF-Trocknung fotografischer Filme

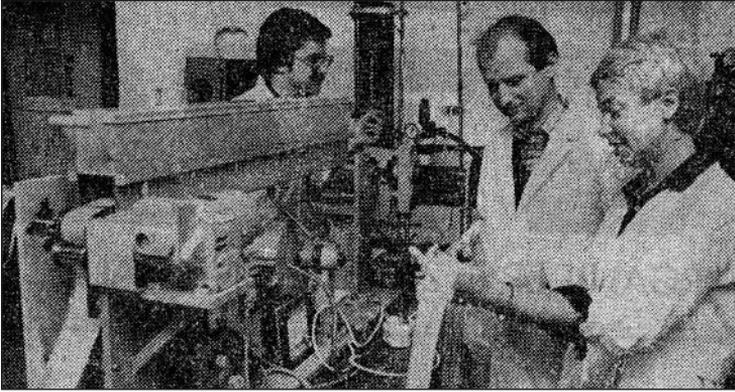


Bild 3
Frank APSEL,
Ludwig GRADER
und Brigitte FRANKE
(v.l.n.r.) an der Labor-
beschichtungsanlage
(THC Echo), 1982
[6]



Bild 4 Dr. Reinhard KÄRMER (links) und Dipl.-Ing. Frank APSEL an der Beschichtungsmaschine im Problemlabor "Technologie der IAM", 4.4.1989 [7]

dium der Verfahrenstechnik an der THLM, 1970 als Dipl.-Ing. abgeschlossen, 1970-76 Forschungsstudium und wissenschaftliche Assistenz an der THLM bei Prof. Dr. Ernst-Otto

REHER, 1976 Promotion zum Dr.-Ing. und 1986 Promotion zum Dr. sc. techn. (1991 Umwandlung in Dr.-Ing. habil.) war von 1976 bis 1990 als wissenschaftlicher Mitarbeiter des

Fotochemischen Kombinats ORWO Wolfen in das Problemlaboratorium "Technologie der IAM" abgeordnet, wo er wie vor ihm Günter MATTER als stellvertretender Laborleiter (Leiter: Prof. Dr.-Ing. Ernst-Otto REHER) tätig war (Bild 3) [3,7]. Nach dem Aufbau des Labors waren ab 1980 8-10 Mitarbeiter, davon drei technische Kräfte, im Problemlabor "Technologie der IAM" tätig. Die Wissenschaftler waren in der Regel Verfahrenstechniker, einer war Mathematiker [3].

Zu den Aufgaben des Problemlabors "Technologie der IAM" gehörten Untersuchungen zu den rheologischen, grenzflächendynamischen und trocknungstechnischen Grundlagen von Beschichtungsprozessen bei der Herstellung von IAM. Als Schwerpunktthemen wurden bearbeitet [3]:

- Intensivierung von Trocknungsprozessen für fotografische Filme,
- Anpassung rheologischer und grenzflächendynamischer Eigenschaften von Fotofilme-mulsionen als Grundlage für Rezepturoptimierungen,
- Entwicklung neuer Beschichtungstechniken für fotografische Filme und Magnetbänder,
- Entwicklung von spezieller Messtechnik für rheologische, grenzflächendynamische und trocknungstechnische Eigenschaften von Beschichtungsflüssigkeiten.

Die Arbeiten des Problemlabors erfolgten in enger Kooperation mit der Hauptabteilung "Technologische Forschung und Entwicklung (TFE)" des FCK (Leiter: Dr. Walter STURM). Sie dienten besonders als Grundlage und Vorbereitung für technologische Entwicklungen, die federführend von der Abteilung "Begieß-technik" durchgeführt wurden (Leiter: Dipl.-Ing. Peter GELLRICH) [3].

1983 wurde das Kollektiv des Problemlabors "Technologie der IAM" für die Untersuchungen der wissenschaftlichen Grundlagen zur Erzeugung des Mehrschichtenbegusses bei der Herstellung von IAM anlässlich des Konzils der THLM mit dem Wissenschaftspreis der THLM ausgezeichnet. Die Mitglieder des Problemlabors Prof. Dr. Ernst-Otto REHER, Dr. Reinhard KÄRMER, Dr. Ottomar RÜHL, Dr. Roland LIPP, Ludwig GRADER, Frank APSEL, Kornelius KROMANN, Christine HOFFMANN und ihre Partner Dr. Ulrike VOSS (Sektion Verfahrenstechnik der THLM), Dr. Günter MATTER, Peter GELLRICH und Andreas ZULEEG (Filmfabrik Wolfen) sowie Prof. Dr. Joachim BERGMANN und Wolfgang RADTKE (beide Pädagogische Hochschule Köthen), erhielten aus diesem Anlass auch die beliebte Carl-Schorlemmer-Medaille (Bild 5) [6].

1987 ist im Problemlabor ein Scheibenrheometer als Zusatzgerät für das Rotationsviskosimeter "Rheotest" des VEB Medinger Laborgerätewerk (MLW) Medingen entwickelt worden (Bild 6) [6]. Mit diesem Gerät wurde die Erfassung viskoelastischer Stoffeigenschaften von Polymerlösungen, wie Beschichtungsflüssigkeiten, Kunstfasern oder Klebstoffen, unter Produktionsbedingungen möglich. Die Vorstellung und Verteidigung erfolgte am 4.12.1987 auf einem Kolloquium der Fakultät für Technische Wissenschaften und Mathematik der THLM. Ein zwischen den Kombinaten MLW und FCK sowie der THLM geschlossener Vertrag bereitete die Serienfertigung im Prüfgerätewerk Medingen vor, kam aber nicht mehr zum Tragen [6].

Prof. Dr.-Ing. Reinhard KÄRMER (1993-2013 Professur an der Hochschule Anhalt in Köthen) schätzt die Arbeit im Problemlabor "Technologie der IAM" rückblickend so ein: *"Die Bedeutung und Wichtigkeit der Tätigkeit des Pro-*



Bild 5 Carl-Schorlemmer-Medaille der THLM



Bild 6 Scheibenrheometer, 1987 [6]

blemlabors "Technologie der IAM" ist vor allem in den Arbeiten zu sehen, die entscheidende Grundlagen für die Lösung der beiden Schwerpunktaufgaben schafften, die aus damaliger Sicht von existenzieller Bedeutung für das FCK waren: die Umstellung der Fotorezepturen von hydrophilen Farbkupplersystemen des AGFA-Systems auf dispergierte, hydrophobe Farbkuppler analog dem Kodaksystem (geeignet für das weltweit angewandte Kodak-Entwicklerverfahren) und Entwicklung einer neuen Magnetbandbeschichtungstechnik für Mehrschichtmaterialien" [3].

Ernst-Otto REHER † schätzte diese industriennahe Tätigkeit für das Fotochemische Kombinat ORWO Wolfen rückblickend so ein: "1977 wurde ...(die im Rahmen der Hauptforschungsrichtung Verfahrenstechnik betriebene Grundlagenforschung durch eine) überwiegende technologische Forschung durch die Gründung des Problemlaboratoriums 'Technologie der IAM' (ergänzt). Mit diesen Einrichtungen wurde es möglich, sowohl verarbeitungstechnische Grundlagen zur rheologischen Stoffkennzeichnung, zu Prozessuntersuchungen, als auch zu angewandten Forschungsergebnissen für die Industrie durchzuführen. Die Forschungsergebnisse zur Rheologie der Fluide und zu den verarbeitungstechnischen Prozessen wurden für die vertiefte Ausbildung von Verfahrensingenieuren genutzt" [8]. ■

Zusammengestellt von
Dr. Dieter SCHNURPFEIL

Quellen

- [1] Manfred GILL, Gerold HÄRTER, Horst KÜHN: “Von gestern bis heute – Ein Gang durch die ehemalige Filmfabrik”, Hrsg.: Industrie- und Filmmuseum Wolfen e.V., 2002, S.18
- [2] Egon FANGHÄNEL: persönliche Mitteilungen, 14.7. und 9.9.2017
- [3] Reinhard KÄRMER: Gespräch in den Räumen des SCI an der Hochschule Merseburg mit Prof. Dr. Thomas MARTIN, Prof. Dr. Klaus KRUG, Prof. Dr. Hans Joachim HÖRIG, Dr. Jochen GERECKE und Dr. Dieter SCHNURPFEIL, 2.8.2017, persönliche Mitteilung, 22.9.2017
- [4] Günter MATTER: persönliche Mitteilungen, 9. und 22.9.2017,
- [5] Günter MATTER, Gerhard GRUHN: “Die Trocknung von Papier im HFT-Kanal”, *Wiss. Z. TH Leuna-Merseburg* 18 (1976) 2, S. 211
- [6] Brigadetagebücher Problemlabor “Technologie der IAM”, 1981-88, derzeit im Besitz von Günter MATTER
- [7] Svetlana REHER: zur Verfügung gestellte Dokumente und Bilder aus dem Nachlass von Prof. Dr.-Ing. Ernst-Otto REHER
- [8] Ernst-Otto REHER: “Verarbeitungstechnik”, in: *Merseburger Beiträge zur Geschichte der chemischen Industrie Mitteldeutschlands – 50 Jahre Hochschule in Merseburg*, 2. Auflage, Hrsg.: SCI, Merseburg 2006, S. 102 und “Verarbeitungstechnik”, in: “60 Jahre Hochschulcampus Merseburg”, Hrsg.: Hochschule Merseburg, 2014, S. 92

Die Begießmaschine im Industrie- und Filmmuseum Wolfen



Bild 1 Das Industrie- und Filmmuseum Wolfen im Gebäude der ältesten Begießerei aus der Gründerzeit um 1909 (Eingangsbereich, Ansicht von Westen), 2006

In dem heutigen Gebäude des **Industrie- und Filmmuseums Wolfen*** (IFM, Bild 1) wurde Fotografie- und Filmgeschichte geschrieben. Die Aktiengesellschaft für Anilinfabrikation (AGFA) produzierte unter dieser Bezeichnung seit 1873 in Berlin künstliche Grundchemikalien und synthetische Farbstoffe. 1888 begann die Herstellung von Fotochemikalien, 1894 die Produktion fotografischer Trockenplatten und schließlich ab 1896 die Produktion von fotografischen Filmen. Die AGFA errichtete 1909/10 den noch heute teilweise erhaltenen Gebäudekomplex. Ursprünglich als reine Kinofilmproduktionsstätte für die aufstrebende Kinoindustrie geplant, wurde die Produktionspalette laufend erweitert und entsprechend den Forderungen des Marktes qualitativ verbessert [1].

1923 gelang es erstmals, zwei Schichten übereinander zu gießen. Der Antrag von zwei Emul-

sionsschichten unterschiedlicher Empfindlichkeit und Gradation (Steilheit der Dichtekurve) führte noch im gleichen Jahr zur Produktion des Kinenegativfilms "Agfa-Negativ-Extrarapid" mit hoher fotografischer Empfindlichkeit und guter Schärfe. In der Folge musste die Begusstechnologie mit dem Ziel weiterentwickelt werden, die Farbmaterialien mit bis zu 14 Einzelschichten beim ORWO-Farbnegativfilm QRS 100 in guter Qualität ökonomisch fertigen zu können (Bild 2) [2].

Zur Sicherung der Qualitätsparameter (Filmentwicklung, Bildqualität, Bildschärfe) war es erforderlich, bei Erhöhung der Anzahl der Schichten die Gesamtschichtdicke (ca. 25 μm) kaum zu erhöhen. Es war also notwendig, dünnere Einzelschichten zu gießen – eine Herausforderung für die Begusstechnologie. Die Optimierung der rheologischen und grenzflächen-

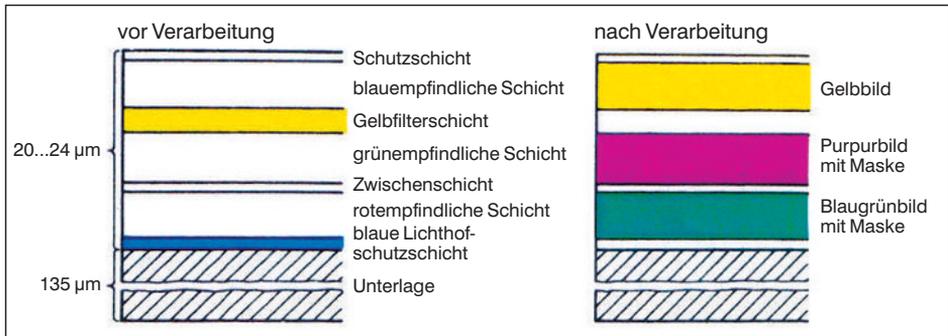


Bild 2 Schichtaufbau eines Farbnegativfilmes (vereinfacht) [2]

dynamischen Parameter der Begießlösungen und der Antrag von mehreren Schichten in einem Durchlauf bei Verringerung der Schichtdicken waren die wesentlichen Forschungsaufgaben. Der erste Antrag von zwei Schichten in einem Durchlauf unter Produktionsbedingungen gelang 1965 mit einem in der Filmfabrik Wolfen entwickelten und gefertigten Zweischlitzgießer SG 2 an der Begießmaschine G. Das Prinzip beruht darauf, dass die unterschiedlichen Beschichtungsflüssigkeiten aus parallelen Schlitzten auf einer Schräge zur Beschichtung auf die Filmunterlage geführt werden.

Beginnend mit der Inbetriebnahme der Filmfabrik Wolfen im Jahre 1910 bis zur Einleitung der Liquidation 1994 wurde in Wolfen ein großes fotochemisches Sortiment hergestellt:

- Filme für die Foto- und Kinematografie (Schwarzweißfilme 1911-94, Farbfilme 1930-94).
- Colorpapier (1948-67, Produktionseinstellung durch RGW-Spezialisierung, 1987-90 Versuchsproduktion eines qualitativ hochwertigen Colorpapiers).
- Fototechnische Materialien für die Druckindustrie (Halbton-, Strich- und Rasterfilme, fototechnische Platten, 1921 bis etwa 1974

komplette Herstellung vom Beguss bis zur Konfektionierung, danach Beguss in der Filmfabrik Wolfen und Konfektionierung im Kombinatbetrieb Fotopapierwerk Wernigerode).

- Materialien für die Mikrodokumentation (Mikroaufnahme-film, Kopierfilm, etwa 1960-74 komplette Fertigung in der Filmfabrik, danach Beguss in Wolfen und Konfektionierung im Fotopapierwerk Wernigerode).
- Röntgenfilme für medizinische und technische Zwecke (1921 bis etwa 1974 komplette Herstellung in der Filmfabrik, nach der Kombinatbildung 1970 ab etwa 1975 schrittweise Verlagerung der Produktion vom Beguss bis zur Konfektionierung in das Fotochemische Werk Berlin/FCW).
- Materialien für die wissenschaftliche Fotografie (1932-94, Spektral-, Kernspur-, Astro-, Elektronen- und Holografieplatten, 1932 erfolgte die Verlagerung der Fotoplattenproduktion vom AGFA-Gründungsstandort Berlin-Treptow nach Wolfen und dort erfolgte der Aufbau eines anspruchsvollen, vielseitigen Plattensortimentes für die Anwendung in der Wissenschaft).
- Materialien für die Luftbildfotografie (ab etwa 1925 Fliegerfilm, Infrarotfilm, Topo-

Sachzeugen vorgestellt

platte, in den 1970er Jahren Filme für die Multispektralkamera aus Jena, 1976 Einsatz in Sojus 22).

- Fotochemikalien (Entwickler, Fixierbäder, Bleichbäder, Unterbrecherbäder, Lichtschutzbäder, Verstärker, Abschwächer, 1932/33 Produktionsverlagerung von Berlin nach Wolfen, etwa 1974 Verlagerung in den Kombinatbetrieb Gelatinewerk Calbe).
- Lichtfilter für die Anwendung in der Foto- und Kinematografie (1933 Verlagerung der Fertigung von Berlin-Treptow nach Wolfen, Fertigung bis 1994).

An der im Industrie- und Filmmuseum Wolfen zu besichtigenden ältesten Wolfener Begießmaschine 7 (Bild 3) gossen die Filmwerker 1936 den ersten universell einsetzbaren Mehrschichtenfarbfilm der Welt. Im Jahre 1941 gelangte der erste Farbfilm aus Wolfener Material in Deutschlands Kinos zur Aufführung. Es war der Streifen "Frauen sind doch bessere Diplomaten" mit Marika RÖKK und Willy

FRITSCH in den Hauptrollen. Weitere, auf AGFA-Rohfilmmaterial gedrehte Filme, wie z.B. "Münchhausen" mit Hans ALBERS, folgten. Ab 1964 wurden die fotografischen Materialien unter dem Namen ORWO (**O**ri**R**iginal **W**olfen) vertrieben.

Interessante Aspekte über die einst schwere Arbeit in den Dunkelräumen sowie über die Geschichte von AGFA und ORWO erfahren die Museumsbesucher im Rahmen der Führung durch die Ausstellung "Filmherstellung". Das Museum informiert auch über die Industriegeschichte der Region Bitterfeld-Wolfen.

Ein Höhepunkt für Freunde der Fotografie ist die "Schatzkammer" des Museums: Die mit über 800 Fotoapparaten größte öffentlich zugängliche Sammlung Sachsen-Anhalts zeigt einen Querschnitt vorwiegend deutscher Kameraproduktion.

Bild 3 öffnet uns den Blick in den Gießraum der ehemaligen Begießerei 1 (heute Industrie- und Filmmuseum Wolfen) mit der historischen

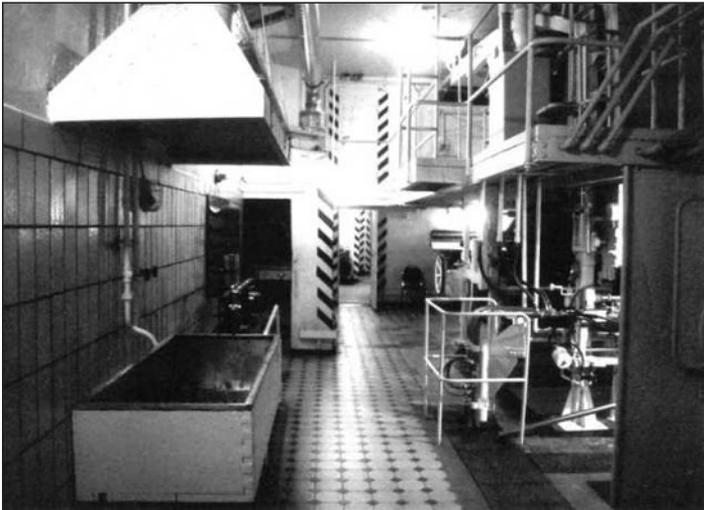


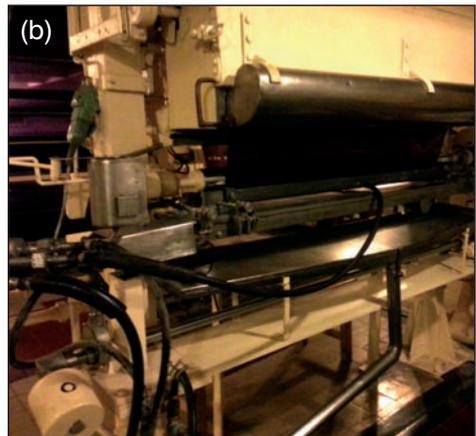
Bild 3
Blick in den Gießraum
der ältesten Begießerei mit
der Begießmaschine 7
(rechts im Bild)

Begießmaschine 7 (Bilder 4 a-c). Sie wurde 1935/36 für den Agfacolor-Neu-Film rekonstruiert und auf “doppelte Begußbreite” (von 60 cm auf 120 cm) umgebaut. An ihr wurden die meisten Versuche und die spätere Produktion des “Agfacolor-Neu” gefahren. Im Museum ist anschaulich zu sehen, wie die Filmbahn abgewickelt und über Walzen zum Gießer geführt wird. Dabei handelt es sich um einen Tauchgießer, der mit Emulsion gefüllt ist (Bilder 4 a+b).

Im Tauchgießer taucht die Filmbahn in die Emulsion ein und nimmt entsprechend ihrer Verweilzeit und der Viskosität der Begießlösung eine entsprechende Menge Emulsion mit

(Bild 5). Im Erstarrungsschacht wird Luft mit 4-6°C auf die mitgenommene Schicht geblasen und diese erstarrt. Über ein entsprechendes Walzensystem gelangt die Filmbahn in die Trockenzone, die “Hänge” genannt wird (die Filmbahn hängt in Schleifen und wird so durch die Trockenzone geführt).

An der Begießmaschine 7 konnte nur einschichtig begossen werden. Somit war zur Fertigstellung eines Color-Umkehrfilms, der aus mindestens vier Schichten bestand, ein mehrmaliger Durchlauf notwendig. An der Begießmaschine 7 konnten Begießgeschwindigkeiten bis 10 m/min. realisiert werden. Beim Arbeiten



Bilder 4 a-c
Ansichten der historischen Begießmaschine 7
im Industrie- und Filmmuseum Wolfen
Bild (a): Antragsstelle mit Gießer
und beheizbaren Emulsionsleitungen
Bild (b): Antragsstelle
Bild (c): Filmabwicklung

Sachzeugen vorgestellt

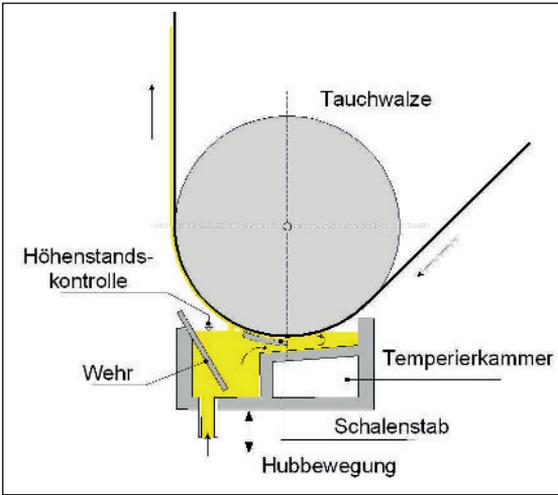
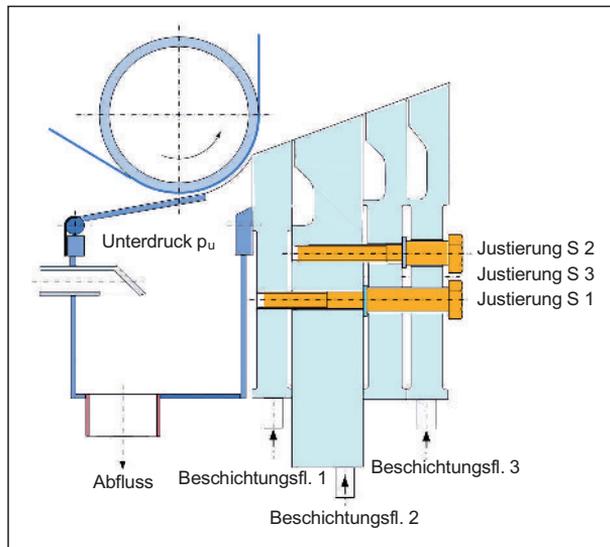


Bild 5 Schematische Darstellung eines Tauchwalzengießers (vgl. Bilder 4 a+b) [3]

im Gießraum und in der Hänge durften nur dunkelgrüne Positionslampen Licht spenden.

Die Begießmaschine 7 wurde bis in die 1980er Jahre für Versuche benutzt. Für die Produktion standen moderne Anlagen zur Verfügung mit Intensivtrockenkanälen und Kaskadengießern (Schlitzgießer, Bild 6). Dabei konnten in einem Durchlauf mehrere Schichten angetragen werden. Die Begießgeschwindigkeiten lagen hierbei um 60 m/min. Entscheidend für einen qualitätsgerechten Beguss waren die rheologischen und grenzfächendynamischen Eigenschaften der Begießlösung für die lichtempfindliche Schicht.

Bild 6 Prinzipdarstellung eines 3-Schlitzgießers [3] 6



Die Begießmaschinen, einschließlich der Gießler und Trocknungskanäle, wurden ausschließlich in der Filmfabrik ORWO Wolfen entwickelt und gebaut. Die Wickelstation war eine Eigenentwicklung der Hauptabteilung Konstruktion. 1988 wurde ein Schlitzgießer mit sechs justierbaren Schlitzen zur Herstellung von mehrschichtigen fotografischen Filmen entwickelt und angefertigt (Bild 7). Mit dem Gießler konnten gleichzeitig sechs Schichten in einer Breite von 1,15 m an die Filmunterlage angetragen werden. Der Gießler war eine Eigenentwicklung der Abteilungen Begießtechnik und Konstruktion. Die Fertigung des Gießlers mit Schlitzweiten-Genauigkeiten von +/- 1 µm erfolgte

in der Zentralwerkstatt der ORWO Filmfabrik Wolfen. Im gleichen Jahr wurde auch die neue Begießstation der Begießmaschine F mit Gießlergestell, Gießwalze und Gießler gefertigt



Bild 7
Schlitzgießer mit sechs
Schlitzten (derzeit im
Museum ausgestellt)



Bild 8
Begießstation
der Begießmaschine F
(mit Gießergestell, Gieß-
walze und Gießer,
derzeit nicht im Museum
ausgestellt)

(Bild 8). Sie war eine Eigenentwicklung der Abteilungen Begießtechnologie und Konstruktion. Hergestellt wurden diese Baugruppen in der Zentralwerkstatt der ORWO Filmfabrik Wolfen bzw. im Sonderanlagenbau Gölzau.

Der langjährige Leiter der Begießereien der Filmfabrik Wolfen und heutige Vorsitzende des

Industrie- und Filmmuseums Wolfen e.V., Dipl.-Ing. Horst KÜHN, würdigte Verein und Museum mit den Worten: *“Wir haben es uns zur Aufgabe gemacht, die Geschichte der Filmfabrik Wolfen an Hand des umfangreichen Archivmaterials zu dokumentieren und damit die Leistungen der Wissenschaftler, Ingenieure und Arbeiter für die Nachwelt zu erhalten. In*

Sachzeugen vorgestellt

der Entwicklung der Bildaufzeichnungsmaterialien hat die Filmfabrik Wolfen immer eine führende Rolle gespielt. Herausragendes Beispiel ist die Produktion des ersten praktikablen Farbfilms weltweit Mitte der 1930er Jahre. Mit der beginnenden digitalen Bildaufzeichnung ging Mitte der 1990er Jahre die fast 90-jährige Industriegeschichte der Filmfabrik Wolfen zu Ende [4,5].

Wer mehr über die Filmgeschichte wissen will, findet in dem Buch *“IN FARBE – die Agfa-ORWO-Farbfotografie”* von Ehrhard FINGER eine ausführliche Darstellung der Entwicklung der Fotografie, die eine *“chemische”* war. Wir erfahren aus heutiger Sicht, welche Aufgaben in der Frühzeit der Entwicklung von der Filmfabrik Wolfen dazu bewältigt werden mussten. Die ersten Ansätze zur Darstellung eines farbigen Bildes und die ersten Forschungsarbeiten 1908 in Berlin sowie die über 80-jährige Geschichte der AGFA/ORWO Farbfotografie sind dokumentiert. Auf besonderes Interesse stoßen sicherlich auch die geheimen For-

schungsarbeiten in der Filmfabrik Wolfen, die bisher nicht veröffentlicht worden sind. Die rund 200 Bilder und Grafiken veranschaulichen die Leistungsfähigkeit der im Buch beschriebenen Verfahren und bereichern die Geschichte der farbigen Bildaufzeichnung. Dieses Buch setzt einen Schlusspunkt der *“chemischen”* Farbfotografie und ergänzt die Ausstellung im Industrie- und Filmmuseum in hervorragender Weise [2]. ■

Dipl.-Ing. Horst KÜHN
Andrea MÄHL, Uwe HOLZ
Dr. Günter MATTER
Dipl. Chem. Ehrhard FINGER
Dr. Dieter SCHNURPFEIL

Quellen

- [1] Autorenkollektiv: *“Ein Museum stellt sich vor (Museumskatalog)”*, Industrie- und Filmmuseum Wolfen e.V., 1995
- [2] Ehrhard FINGER: *“IN FARBE – Die AGFA-ORWO-Farbfotografie”*, Hrsg.: Dr. Günter MATTER, Frühwerk Verlag Berlin-Hildesheim-Luzern, 2014
- [3] Peter GELLRICH: *“Entwicklung der ‘Neuen Filmtechnologie’ in der Filmfabrik Wolfen”*, unveröffentlichtes Manuskript
- [4] Manfred GILL, Gerold HÄRTER, Horst KÜHN: *“Von gestern bis heute – Ein Gang durch die ehemalige Filmfabrik”*, Hrsg.: Industrie- und Filmmuseum Wolfen e.V., 2002, S.3
- [5] Wolfgang KUBAK, Peter ULBRICHT: *“Die Welt wird digital – analoge und digitale Fotografie auf lange Sicht in Idealkonkurrenz”*, Hrsg.: Industrie- und Filmmuseum Wolfen e.V., Heft 10, um 2002

Fußnote:

**Industrie- und Filmmuseum Wolfen*

Bunsenstraße 4, 06766 Bitterfeld-Wolfen, OT Wolfen

Tel.: 03494 - 63 64 46 / Mail: info@ifm-wolfen.de / Internet: www.ifm-wolfen.de

Öffnungszeiten: Dienstag bis Sonntag: 10 bis 16 Uhr; Führungen: 10, 12 und 14 Uhr

Mitteilungen aus dem Verein

Die Kolloquien des Jahres 2018

(Alle Vorträge finden statt im Hörsaal 9 der Hochschule Merseburg, Beginn jeweils 17 Uhr)

223. 18. Januar 2018
Prof. Dr. Karl-Dietrich MORGENEIER, Jena
“Anwendungen der maschinellen Intelligenz in der Verfahrenstechnik”
224. 15. Februar 2018
Dr. Peter LÖHNERT, Dessau
“Flucht und Emigration jüdischer Wissenschaftler aus den Bitterfelder und Wolfener I.G.-Werken während der NS-Zeit”
225. 15. März 2018
Prof. em. Dr. Peter NUHN, Leipzig
“Mythos Wasser”
226. 19. April 2018
Dr. Christoph MÜHLHAUS, Halle
“Strategischer Ansatz zur strombasierten Wasserstofftechnik im Mitteldeutschen Chemiedreieck”
227. 17. Mai 2018
Prof. Dr. Bernhard ADLER, Halle
“Industriemetalle – Applikationen und Recycling”
228. 21. Juni 2018
Dipl.-Ing. Peter KECK, Merseburg
“Zur Geschichte des 1300-jährigen Eisenerzabbaus am Steirischen Erzberg in Österreich”
229. 20. September 2018
Dipl.-Ing. Fred HOLLENBACH, Magdeburg
“Der Weg vom DÜV (D=Dampfkessel) zum TÜV - in der Region Sachsen-Anhalt”
230. 18. Oktober 2018
Dr. Ralf SCHADE, Leuna
“Das Zwangsarbeiterstammlager Buna-Werke Schkopau 1939-1945”
231. 15. November 2018
Erich GADDE, Halle
“Neues zur Geschichte der Fabrik für chemische Kampfstoffe ORGACID in Halle-Ammendorf”

Quellenverzeichnis Bilder

Beitrag Axel GÖTTFERT

Bilder 1-17 GÖTTFERT Werkstoff- und Prüfmaschinen GmbH, Buchen/Odenwald

Beitrag Hans-Joachim RADUSCH

Bilder 1-21 sind durch Literaturangaben belegt

Zeitzeugen vorgestellt: Otto GÖTTFERT

Bilder 1-3 aus dem Nachlass von Ernst-Otto Reher, im Besitz von Svetlana REHER

Bild 4 A. S. DUDYREV: "Das Technologische Institut – Erinnerungen eines Rektors" (russ.), Verlag Amphora, Sankt Petersburg 2010, S. 352/353

Zeitzeugen vorgestellt: Ernst-Otto REHER

Bilder 1-3, 5-10 aus dem Nachlass von Ernst-Otto REHER, im Besitz von Svetlana REHER

Bild 4 "60 Jahre Hochschulcampus Merseburg", Hrsg.: Hochschule Merseburg, 2014, S.31,
Bildquelle: Martina TÄNZER

Bild 11 A. S. DUDYREV: "Das Technologische Institut – Erinnerungen eines Rektors" (russ.), Verlag Amphora, Sankt Petersburg 2010, S. 352/353

Zeitzeugen berichten: Das Problemlabor "Technologie der IAM"

Bild 1 Bildarchiv Industrie- und Filmmuseum Wolfen e.V.

Bilder 2 und 5 Fotograf: Dr. Günter MATTER

Bilder 3 und 6 zur Verfügung gestellt von Dr. Günter MATTER

Bild 4 zur Verfügung gestellt von Svetlana REHER

Sachzeugen vorgestellt: Die Begießmaschine im Industrie- und Filmmuseum Wolfen

Bilder 1 und 4 Bildarchiv des Industrie- und Filmmuseums Wolfen, Fotografin: Andrea MÄHL, Wolfen

Bild 2, 5 + 6 sind durch Literaturangaben belegt

Bild 3 Fotograf: Volker WEINHOLD, Berlin

Bilder 7+8 Fotograf: Dr. Günter MATTER



deutsches
chemiemuseum
merseburg

