

Viskosität messen, steuern und regeln

Interessant ist die Bestimmung des Fließverhaltens von Flüssigkeiten bei der Verarbeitung von Farben und Lacken, Schmelzen, Suspensionen, Emulsionen und Pasten. Die Kontrolle der Verarbeitbarkeit von Farben oder Beschichtungsmaterialien wird bisher meist nur bei der Wareneingangskontrolle oder durch regelmäßige Probenentnahme und Messung der Viskosität im Labor durchgeführt. Hilfreich, zeit- und Kosten sparend, produkt- und prozessnäher ist jedoch die Bestimmung der Viskosität direkt im Fertigungsprozess. Diese Online- Messungen ermöglichen eine automatische Regelung des Prozesses und entlasten somit das Personal. Im Folgenden wird ein Überblick über die verschiedenen Online- Meßverfahren gegeben und die Auswertung eines der Viskosität analogen Signals zur Regelung eines Produktionsprozesses dargestellt.

Allgemeines

Bedingt durch höhere Anforderungen an eine gleich bleibende Produktqualität bei gleichzeitiger Minimierung des Ausschusses wird die kontinuierliche, Produktion begleitende Viskositätsmessung immer wichtiger. Auch im Hinblick auf die Zertifizierung nach DIN ISO 9000ff kann eine solche Viskositätskontrolle interessant sein.

Der Rückschluss von Messergebnissen aus Labormessungen auf die Verarbeitbarkeit des Produkts während der Produktion ist schwierig, da die Viskosität eines Stoffes von verschiedenen Randbedingungen (Druck, Temperatur, Volumenstrom, Zeit usw.) abhängig ist. Meist ist es im Labor nicht möglich auch nur annähernd vergleichbare Bedingungen zu simulieren. Im Labor gemessene Viskositätswerte müssen demzufolge immer „hochgerechnet“ werden, was zu Fehlern führen kann. Die Vergleichbarkeit von Viskositätsmessungen im Labor und Prozess ist außerdem dadurch erschwert, dass die dynamischen Bedingungen (z. B. die Scherbelastung oder allgemeiner die auf die Probe wirkenden Kräfte) in einem Kessel ganz andere sind als in einem Labor- Meßsystem.

Einbauort des Rheometers

Man unterscheidet Tauch-, Inline- und Onlinesysteme je nach der Art des Einbaus:

- **Tauchsystem:** Das Meßsystem wird in einen Behälter eingebaut.
- **Inline-System:** Das Messgerät befindet sich direkt in der Rohrleitung.
- **Onlinesystem:** Das Messgerät wird in einen Bypass eingebaut.

Bei der Auswahl einer dieser Varianten müssen folgende Vor- bzw. Nachteile abgewogen werden:

- **Tauchsystem**

Das Tauchsystem wird einen offenen, drucklosen Behälter eingebaut. Im Behälter sollte das Produkt bewegt werden, um zu garantieren, dass das Messsystem durchströmt wird.

- **Inlinesystem**

Der Einbau des Rheometers in den normalen Produktstrom ist immer wünschenswert, da damit eine kontinuierliche Messung der gesamten Substanz durchgeführt wird. Das Rheometer wirkt allerdings leicht als Drossel.

- **Onlinesystem**

Der Einbau der Rheometers erfolgt in einem Bypass. Somit ist es möglich, den Volumenstrom zu regulieren oder den Bypass z. B. für Wartungs- und Kalibrierarbeiten ganz still zu legen. Es wird im Bypass jedoch nur ein Teil des gesamten Produktstroms vermessen.

Meßverfahren

Abgesehen von der Einbauposition des Rheometers ist im Besonderen das eigentliche Messprinzip von Interesse:

- **schwingende Kugel, Zunge oder Stab**

Ein Element (Kugel, Zunge, Stab), das sich in der Substanz befindet, wird zu einer Schwingung mit hoher Frequenz und geringer Amplitude angeregt. Je hochviskoser die Substanz ist, desto stärker ist die Dämpfung der Schwingung. Aus der Amplitudenänderung lassen sich Rückschlüsse auf die Viskosität des Stoffes ziehen.

Hierbei beeinflussen sowohl die Dichte des Stoffs wie auch lokale Dichteschwankungen das Messergebnis. Da Dichteschwankung durch Pumpenhübe hervorgerufen werden können, sollte besonders auf die Auswahl der Pumpe geachtet werden. Außerdem kann das Messergebnis beeinflusst sein durch:

- die Änderung des Verhältnisses von Flüssigkeits- und Feststoffanteil,
- Luftblasen,
- das zeitlich veränderliche Verhalten der Oberflächenbenetzung oder
- chemisch- physikalische Oberflächenveränderungen durch Anlagerung von Partikeln am schwingenden Element.

Bei Mehrphasensystemen kann der Einfluss der einzelnen Phasenanteile nicht exakt bestimmt werden. Insgesamt muss eine Interpretation der Messergebnisse mit großer Sorgfalt vorgenommen werden.

- **Rotationsrheometer**

Zur Messung der Viskosität lässt man einen Messkörper in der Substanz rotieren. Die Kraft, die benötigt wird, um eine bestimmte Drehzahl zu halten, oder aber umgekehrt, die Drehzahl, die mit einem bestimmten Kraftaufwand erreicht wird, ist ein direktes Maß für die Viskosität des Produkts. Die Laminarität der Strömung am Meßsystem sollte gewährleistet sein, d. h. das Gerät sollte nicht direkt hinter einer Biegung der Rohrleitung eingebaut sein.

Diese Messmethode hat den großen Vorteil, dass die Vergleichbarkeit mit Labormessungen, aufgrund der gleichen Messmethode gegeben ist. Bei diesem Vergleich müssen natürlich Einflüsse wie Temperatur, Volumenstrom usw. berücksichtigt werden. Sogar das Arbeiten bei einer definierten Schergeschwindigkeit oder die Aufnahme einer Fließkurve ist möglich.

- **Taumelkörper**

Dies ist im Prinzip ein Rotationsrheometer, wobei der Messkörper relativ zur Messbecherwand schräg montiert ist, wodurch er eine Taumelbewegung ausführt. Die Bewegung des Messkörpers erzeugt eine Pumpwirkung im Messspalt, wodurch es zu einem schnellen Substanzaustausch kommen soll.

Werden in diesem System nicht Newtonsche Substanzen vermessen, sollte man bei der Auswertung des Messsignals berücksichtigen, dass durch die sich verändernde Breite des Messspalts ein Messsignal aufgenommen wird, das durch die elastischen Stoffeigenschaften beeinträchtigt sein kann.

- Kapillare

Teilweise werden zur Viskositätsbestimmung in Rohrleitungen auch Kapillaren verwendet. Hierzu bringt man diese als zusätzlichen „Auslass“ am Leitungssystem an. Dem messbaren Druckabfall innerhalb der Kapillare kann ein Viskositätswert zugeordnet werden. Diese Meßmethode ist immer mit Produktverlust verbunden.

Zusammenhang Labormessung / Inline- Messung

In Rotationsviskosimetern, die unter Laborbedingungen eingesetzt werden, kann, falls das Meßsystem den in DIN 53 018 und DIN 53 019 festgelegten geometrischen Bedingungen entspricht, die Viskosität berechnet werden als

$$(1) \quad \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

für koaxiale Zylinder ergibt sich

$$(2) \quad \tau = \left(\frac{1+\delta^2}{2 \cdot \delta^2} \cdot \frac{1}{2\pi L R_i^2 C_L} \right) \cdot M$$

$$(3) \quad \dot{\gamma} = \left(\frac{1+\delta^2}{\delta^2 - 1} \cdot \frac{\pi}{30} \right) \cdot n$$

mit	η	Viskosität		
	τ	Schubspannung		
	$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit		
	M	Meßmoment		
	n	Drehzahl		
	R_a	Radius des zylindrischen Meßbechers		
	R_i	Radius des zylindrischen Meßkörpers	$\delta = \frac{R_a}{R_i}$	
	L	Länge des zylindrischen Meßkörpers		
	C_L	Korrekturfaktor abhängig vom Öffnungswinkel des Zylinders		

Mit den Bezeichnungen wie in Abb. 1 dargestellt.

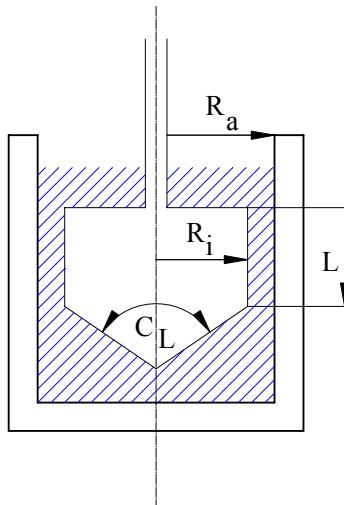


Abb. 1: Zylindermeßsystem

Hierbei geht man von Laminarität in Messspalt und einer Scherbelastung der Probe aus, die nur durch die Bewegung des Messkörpers hervorgerufen wird. Im Weiteren sind die zusätzlich auf die Viskosität der Substanz wirkenden Größen wie z. B. Temperatur, Dichte usw. in fast vollem Umfang im Labor kontrollierbar. Dies ist im Produktionsprozess nicht der Fall.

Bei den meisten Herstellungsverfahren ist es notwendig, bei der Messung im Produktstrom oder im Bypass, die geometrischen Verhältnisse entsprechend DIN 53 019 (vgl. Abb. 1) zu modifizieren, damit genug Volumen das Messgerät durchströmen kann. Aus der Erfahrung zeigt sich, dass die Berechnung der Viskosität aus dem gemessenen Signal sehr genau möglich ist.

Wie aus Gleichung (1) zu erkennen ist, wird die Viskosität als Funktion der Scherbelastung innerhalb des Messraums beschrieben. Die Messung der Viskosität lässt sich unter Verwendung von Gleichung (2) und (3) zurückführen auf die Messung des Moments M und der Drehzahl n . Die Viskosität ist dann proportional dem Verhältnis von Kraft und Drehzahl, wobei sich der Proportionalitätsfaktor nur durch die geometrischen Verhältnisse der Messzelle bestimmt. Dieser Faktor verändert sich während der Messung nicht und kann somit durch Kalibrierung mittels Stoffen bekannter Viskosität bestimmt werden.

Meist ist es jedoch am einfachsten und vollständig ausreichend, das Messmoment als Regelgröße zu verwenden, wobei die Drehzahl konstant gelassen wird. Entscheidend für die Verarbeitbarkeit des Produkts ist ja nicht dass ein Viskositätswert in Zahlen angegeben werden kann, sondern dass das Produkt eine gleich bleibende Viskosität hat.

Viskositätsmessung im Prozeß

Betrachtet man produktionsbegleitende Viskosimeter, so ist die Messung der Viskosität durch diese Einflüsse in einem Maß beeinträchtigt, die unter Laborbedingungen kaum simuliert werden können.

Ein Beispiel hierfür ist die Beschichtung oder das Bedrucken von Materialien. Es ist nicht entscheidend, welche Viskosität die Farbe bei 20 °C im Labor hat, sondern die große Frage ist: Kann man die Farbe im Sommer bei 40 °C und im Winter bei 15 °C verarbeiten und ist das Druckergebnis immer gleich?

Abb. 2 zeigt das vielfach verwendete Online-Viskosimeter Typ Covimat 105 mit Durchflussmesszelle.



Abb. 2

In Abb. 3 ist schematisch die Einbaumöglichkeit eines Online-Viskosimeters mit einem Tauchsystem dargestellt.

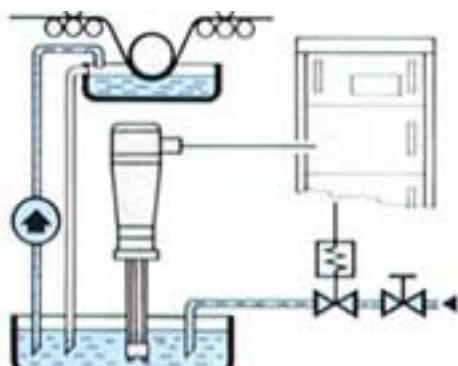


Abb. 3

Grundsätzlich lässt sich festhalten: Die kontinuierlich im Fertigungsprozess gemessene Viskosität ist von verschiedenen Randbedingungen abhängig. Die Zusammenhänge lassen sich messtechnisch erfassen und sind damit auch mathematisch beschreibbar und auswertbar.

Viskositätsabhängige Regelung des Prozesses

Eine geschlossene mathematische Beschreibung der Abhängigkeit der Viskosität von den sie beeinflussenden Größen, wie z.B. Druck oder Temperatur, gibt es nicht. Es ist ausreichend zur Bestimmung der für den Prozess notwendigen Regelgleichungen einmal die wichtigsten Störgrößen im laufenden Betrieb zu erfassen. Aus diesen Daten lässt sich die Viskosität als eine Funktion z. B. folgender Art beschreiben:

$$(4) \quad \eta = \eta(\rho, \vartheta, t, \varepsilon, \dots)$$

$$(5) \quad \ln \eta = A + \frac{B}{T + C}$$

$$(6) \quad \eta = \frac{Pr \cdot \lambda}{g \cdot c_p}$$

Aus den gemessenen Daten und den Einzelgleichungen kann eine Gesamtfunktion hergeleitet werden, die das Viskositätsverhalten dieses Stoffes beschreibt. Ein Aufwand der heute jeder Softwarelösung auf dem Steuerungs - PC möglich ist.

Leicht ist der Vorteil eines solchen Aufwands zu erkennen. Ändert sich eine der Einflussgrößen, so verändert sich auch das Viskositätssignal. Verbindet man nun Regelungstechnisch das Viskositätssignal mit den möglichen Störgrößensignalen z. B. einem Temperatursensor, so ist es möglich, sofort geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten, wodurch die Produktion von „Ausschuss durch Überschreiten des Qualitätsbereichs“ minimiert bzw. vermieden wird. Abb. 4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines solchen Regelkreises mit Rückführung.

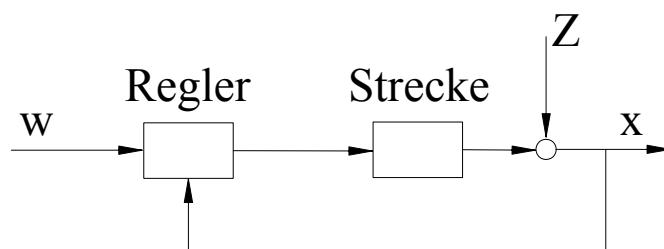


Abb. 4 : Regelkreis

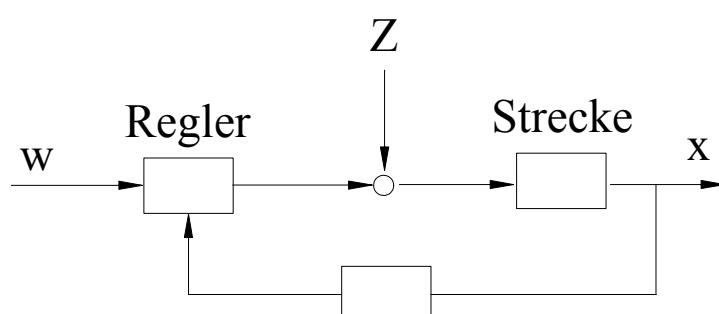


Abb. 5: unterlagerter Regelkreis

Durch Zusammenführen aller Größen und Einflüsse in solchen Regelkreisblockschemata kann man mit einiger Erfahrung, Übung und den notwendigen Anlagenkenntnissen die daraus resultierenden Strukturschaltbilder entwerfen. Abb. 6 zeigt die schematische Darstellung eines Systems mit „Vorgeschichte“.

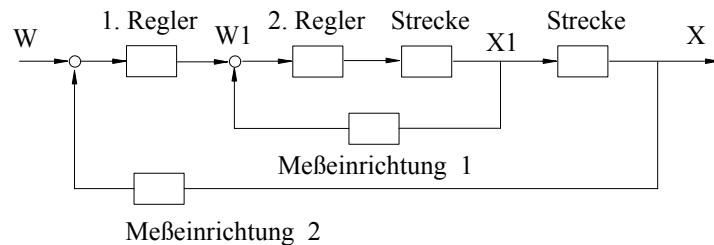


Abb. 6

Für den Käufer eines Inlineviskosimeters ist es meist notwendig, dass er nicht nur bei der Auswahl des Viskosimeters unterstützt wird, sondern auch Hilfestellung bei der Bestimmung der notwendigen Gleichungen für die Übertragungsglieder erhält. Je weitgehender hier eine qualifizierte Beratung erfolgt, desto effizienter kann das Rheometer eingesetzt werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass der Einsatz von Inline- bzw. Online-Viskosimetern eine optimale Qualitätskontrolle im Herstellungsprozess garantieren und darüber hinaus, bei überlegtem Einsatz zur Regelung des Prozesses genutzt werden können.

Lothar Gehm

proRheo GmbH
Bahnhofstr. 38
D-75382 Althengstett
+49-7051-92489-0
www.proRheo.de