


Physikalisch Chemisches Praktikum	Modul Funktion und Anwendung MN-C-FA	 1. Oktober 2010
Rheologie Viskoelastisches Verhalten wurmartiger mizellarer Tensidlösungen		
Raum 223	2. Version	Renke Rommerskirchen Simone Wiegand

1. Motivation

Bei der Herstellung von vielen chemischen Produkten spielen die rheologischen Eigenschaften eine entscheidende Rolle. So möchte man, dass sich die Zahnpasta aus der Tube drücken lässt, aber nicht von der Zahnbürste fließt. Auch die Farbe an der Wand soll sich gut verstreichen lassen, dann aber an der Wand haften. Über das Scherverhalten von Ketchup hat sich sicherlich auch schon mal der eine oder der andere geärgert. Eine weitere Anwendung sind speziell behandelte schussichere Westen, die mit einer speziellen kolloidalen Dispersion getränkt werden. Die Dispersion zeigt einen dramatischen Anstieg der Viskosität – Scherverdickung – bei sehr hohen Scherraten. Dadurch werden schnelle Geschosse sehr viel besser abgehalten als bei herkömmlichen schussicheren Westen. Filme und Bilder zu dem Thema findet man unter: <http://www.ccm.udel.edu/STF/images1.html>. Weitere Informationen findet man im Internet unter:

<http://www.rheology.org/sorindex/default.asp>

<http://www.rheology-esr.org/>

2. Stichpunkte zur Vorbereitung

Viskoelastizität; Maxwell-Modell; Linearviskoelastischer Bereich; Nullscherviskosität; Reptation; Mizellen, Wurmmizellen

3. Aufgabenstellung

Ziel des Versuches ist die Charakterisierung des viskoelastischen Verhaltens einer wässrigen Tensidlösung wurmartiger Mizellen mittels Rheologie. Dazu werden dynamische Oszillationsexperimente durchgeführt. Des Weiteren werden Fließkurven gemessen, um die Fließeigenschaften und die Viskosität der Lösung zu ermitteln.

4. Grundlagen

Wurmartige Mizellen

Tenside sind amphiphile Moleküle. Sie bestehen aus zwei Teilen, einer langen hydrophoben Schwanzgruppe und einer hydrophilen Kopfgruppe. In einer wässrigen Lösung bilden Tensidmoleküle unterschiedliche Strukturen (Aggregate) aus, um somit Kontaktstellen der hydrophoben Schwanzgruppe mit Wasser zu vermeiden.

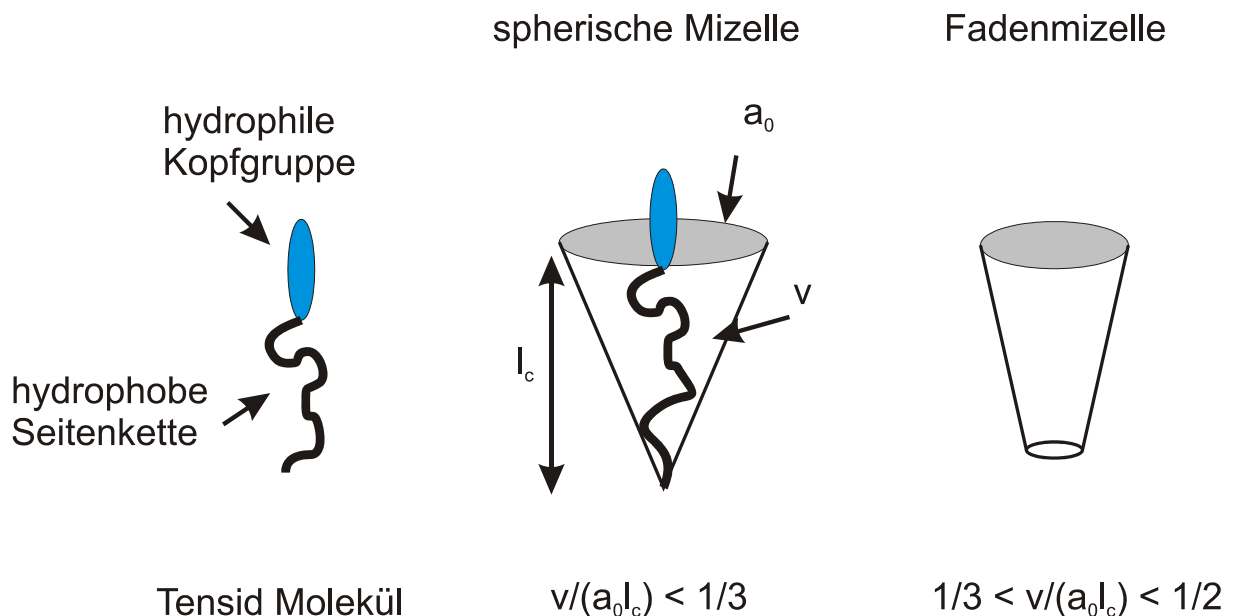


Abbildung 1: Schematische Darstellung mizellarer Strukturen [6].

Die Art der dabei ausgebildeten Aggregate hängt von der Molekülgeometrie des Tensids ab. Die Tensidgeometrie wird durch den Packungsparameter P beschrieben, der von v (= Volumen der Schwanzgruppe), l_c (= Länge der Schwanzgruppe) und a_0 (Flächenbedarf der hydrophilen Kopfgruppe) abhängt. Der Zusammenhang der einzelnen Größen lautet folgendermaßen:

$$P = v / (a_0 l_c) . \quad (1)$$

Zylindrische Mizellen haben eine polymerähnliche Gestalt. Derartige Mizellen werden oft als wurm- oder fadenartig (engl.: threadlike micelles; vgl.: Abbildung 1) bezeichnet. In Lösung liegen sie als isotrope Phase vor. Im Gegensatz zu Polymeren, die eine feste Größe (Polymerisationsgrad) haben, können wurmartige Mizellen spontan an beliebiger Stelle aufbrechen und mit einer anderen Mizelle rekombinieren. Die viskoelastischen Eigenschaften eines solchen Systems werden durch die Kinetik des Kettenaustausches und die dynamischen Eigenschaften des verwendeten Tensids festgelegt.

5. Rheologie

In der Rheologie (aus dem Griechischen; die Lehre vom Fließen) wird untersucht, wie ein System auf eine mechanische Störung reagiert. Hierfür gibt es die zwei Möglichkeiten: elastische Deformation und viskoses Fließen. In Polymerlösungen treten beide Möglichkeiten auf. Bei einem solchen Fall spricht man dann von viskoelastischem Verhalten. Häufig wird zur Beschreibung von viskoelastischem Verhalten das Maxwell-Modell benutzt (vgl.: Abbildung 12a).

Versuchsaufbau

Die folgenden Ausführungen gelten für das im Praktikum eingesetzte Rheometer.

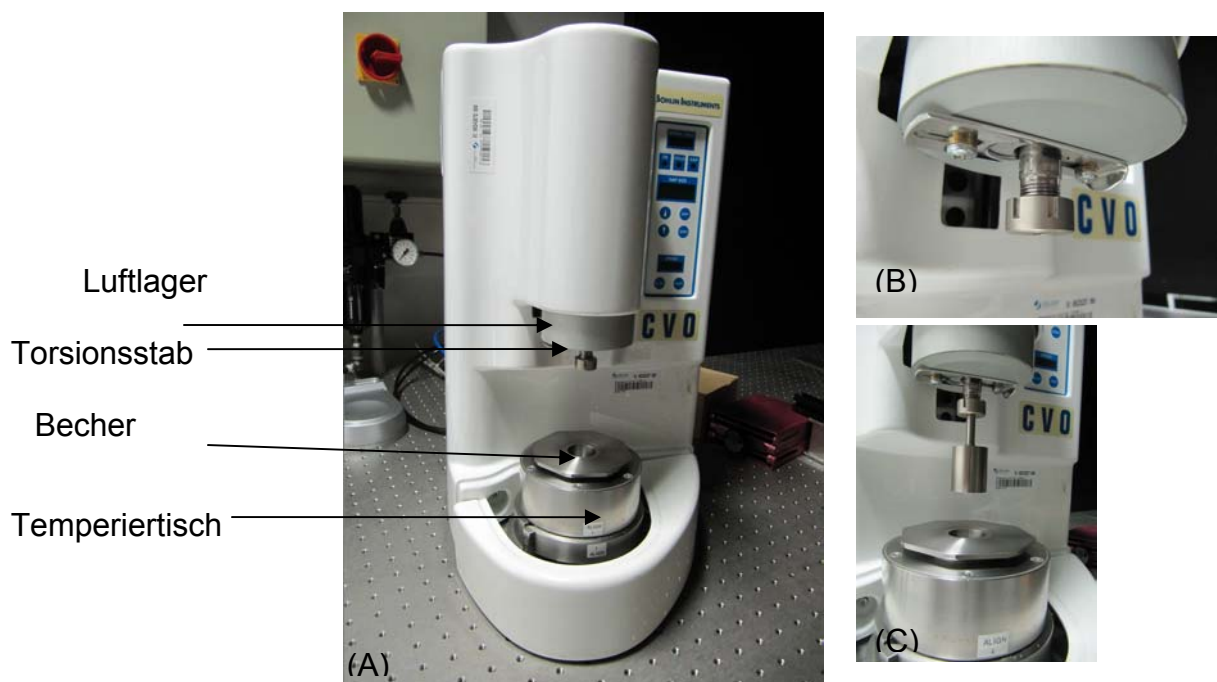


Abbildung 2: (A) Bohlin CVO Rheometer mit einer Zylindergeometrie. (B) Verriegelte Meßsystemaufnahme. (C) Mooney Stempel.

In Abbildung 2 ist ein Bohlin CVO Rheometer mit so genannter Mooney Zylindergeometrie gezeigt. Die Mooney Geometrie entspricht im Wesentlichen einer Zylindergeometrie mit einem Stempel und einem Becher im unteren Teil. Der Stempel weist unten jedoch eine Aussparung auf. Ziel dieser Anordnung ist es, sowohl im Ringspalt zwischen den Zylindern als auch im Bodenspalt möglichst denselben (mittleren)

Scherratenwert zu erhalten. Ein Vorteil des Mooney-Messsystems ist die im Vergleich zum ISO-Zylinder-Messsystem benötigte kleinere Probenmenge.

Zur Befestigung des Mooney Stempel wird die Messsystemaufnahme so gedreht, dass eine der abgeflachten Seiten nach vorne weist. Dann wird die Verriegelung des Luftlagers zum Festziehen der Messsystemaufnahme nach links geschoben. Wenn sich die Verriegelung nicht verschieben lässt, wird die Aufnahme vorsichtig gedreht, bis die Verriegelung unbehindert zur Seite geschoben werden kann. Messsystem durch Drehen nach rechts lockern und oberes Messsystem einsetzen. Wenn sich das Messsystem nicht unbehindert einschieben lässt, muss die Aufnahme etwas weiter geöffnet werden. Das Messsystem bis zum Anschlag nach oben schieben und die Messsystemaufnahme festziehen. Beim Festziehen der Aufnahme das Messsystem leicht nach oben drücken, um sicherzustellen, dass es während dieses Arbeitsschrittes voll in der Aufnahme sitzt.

Die Probe wird in den Becher gefüllt (ca. 2 ml) und der Stempel wird in den Becher gefahren. Der Abstand zwischen Stempel und Becherboden soll 0,300 mm betragen. Bei dem verwendeten Rheometer wird der Becher mit einer gegebenen Winkelverschiebung Ω (rad/s) gedreht. Das resultierende Drehmoment M (Nm) wird über den Stempel und den Torsionsstab an den Meßaufnehmer übertragen. Die angelegte Scherrate und die resultierende Dehnung sind folgendermaßen über die geometrischen Parameter des Messwerkzeugs definiert:

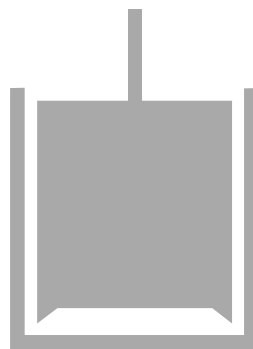


Abbildung 3: Prinzipbild der Mooney Geometrie.

Die Scherrate ist definiert als Geschwindigkeitsgradient des Flusses der Probe durch den Spalt (Deformationsgeschwindigkeit). Bei der verwendeten Geometrie gilt:

$$\dot{\gamma} = d\gamma/dt = C_2 \Omega \quad \text{mit } C_2 = 18,18 \text{ (rad}^{-1}\text{)}. \quad (2)$$

Die Dehnung bzw. Deformation γ (dimensionslos) entspricht dem Verhältnis von der Auslenkung zur Spaltbreite. Die Schubspannung σ (Pa) ist definiert als Kraft pro Fläche. Hier gilt:

$$\sigma = C_1 M \quad \text{mit} \quad C_1 = 35142 \text{ (Pa/Nm)}. \quad (3)$$

Stationäre Strömung

Mit dieser Meßmethode werden Fließkurven aufgenommen (vgl.: Abbildung 5). Für eine angelegte Deformationsgeschwindigkeit ($\dot{\gamma}$) wird die Schubspannung (σ) gemessen, sobald letztere einen konstanten Wert angenommen hat. Die Schubspannung ist definiert als die Scherkraft pro Scherfläche:

$$\sigma = F/A. \quad (4)$$

Aufgetragen wird die Spannung (σ) oder Viskosität (η) gegen die Scherrate ($\dot{\gamma}$).

Newtonsches und viskoelastisches Fließverhalten

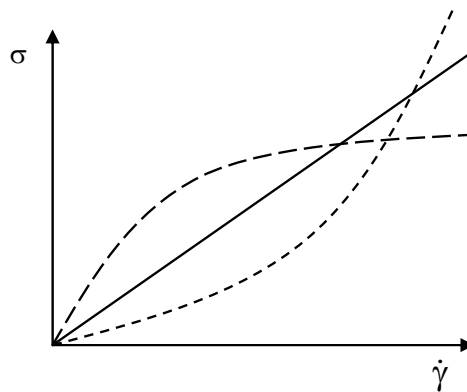


Abbildung 4: Auftragung der Schubspannung gegen die Scherrate. Die Viskosität ergibt sich als Steigung bei newtonschem Verhalten (—), Scherverdünnung (---) und Scherverdickung (- - - -).

Für newtonsche Flüssigkeiten (z.B.: Wasser, Benzol u.s.w.) gilt folgende lineare Beziehung zwischen Scherrate und Spannung.

$$\sigma = \eta \frac{d\gamma}{dt} = \eta \dot{\gamma} \text{ (Newtonsches Gesetz)} \quad (5)$$

Das Newtonsche Gesetz definiert die newtonsche Viskosität, die in diesem Fall unabhängig von der Scherrate und daher gleich der Nullscherviskosität ist (z.B.: Wasser bei 20°C $\eta=1,000 \text{ mPa s}$)

Bei elastischen Festkörpern steht die Schubspannung σ mit der Deformation γ in Zusammenhang. Die Proportionalitätskonstante G wird als Schermodul bezeichnet und hat dieselbe Einheit wie die Spannung.

$$\sigma = G \gamma \quad (\text{Hooksches Gesetz}) \quad (6)$$

Viskoelastische Materialien zeigen sowohl das Verhalten einer Flüssigkeit (Viskosität) als auch das eines Festkörpers (Elastizität). In Abbildung 5b ist eine für derartige Stoffe typische Fließkurve gezeigt. Kolloidale Systeme und Polymerlösungen zeigen oft eine mit steigender Scherrate abnehmende Viskosität (Scherverdünnung). In einigen Fällen tritt bei sehr großen Scherraten ein zweites Plateau auf. Der Wert der Viskosität bei diesem zweiten Plateau wird Hochscherviskosität (η_∞) genannt und tritt durch die stark gestörte Struktur der Lösung bei hohen Scherraten auf. Die Nullscherviskosität (η_0) wird durch Extrapolation auf die Scherrate 0 ermittelt und stellt die Viskosität des ungestörten Systems dar. Zur Beschreibung der bei komplexen Flüssigkeiten auftretenden Scherverdünnung, wurden empirische Gleichungen formuliert.

Cross-Modell:
$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\kappa \dot{\gamma})^n} \quad (7)$$

Carreau-Modell:
$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{[1 + (\kappa \dot{\gamma})^2]^{n/2}} \quad (8)$$

mit κ , n , η_0 und η_∞ als Fitparametern.

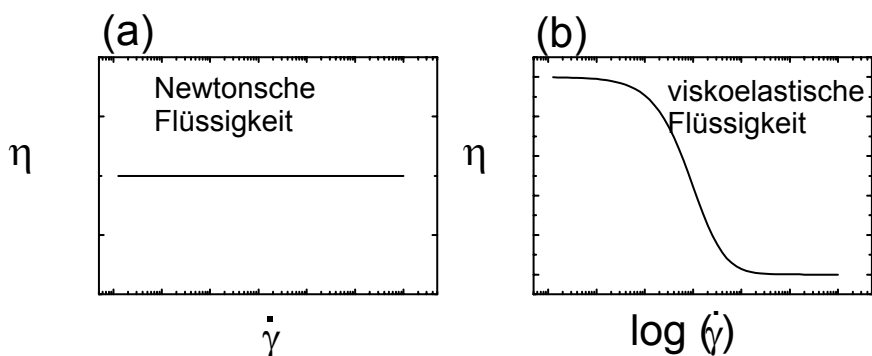


Abbildung 5: Fließkurven einer newtonschen (a) und einer viskoelastischen (b) Flüssigkeit

Eine wichtige Größe zur Charakterisierung viskoelastischer Materialien ist die Relaxationszeit. Bei einer angelegten Dehnung mit einer Frequenz größer der inversen Relaxationszeit dominieren die elastischen, bei kleineren Frequenzen die viskosen Eigenschaften.

Viskoelastische Eigenschaften, Elastizität, Viskosität und Relaxationszeit können durch Kombination verschiedener rheologischer Experimente gemessen werden.

Dynamische Messung

Der runde Zylinder kann als n-faches Vieleck betrachtet werden. Somit kann an jedem Punkt die Oszillation über das Zweiplattenmodell beschrieben werden. In diesem befindet sich die Probe zwischen einer stationären Basisplatte und einer Scherplatte, die mit einem Drehrad über eine Stange verbunden ist. Wird das Drehrad in eine Richtung gedreht, so bewegt sich die Scherplatte auf der Probe hin und her. Die Probe wird nun auf der Scherfläche A mit der Scherkraft F um die Strecke s im Scherspalt h ausgelenkt.

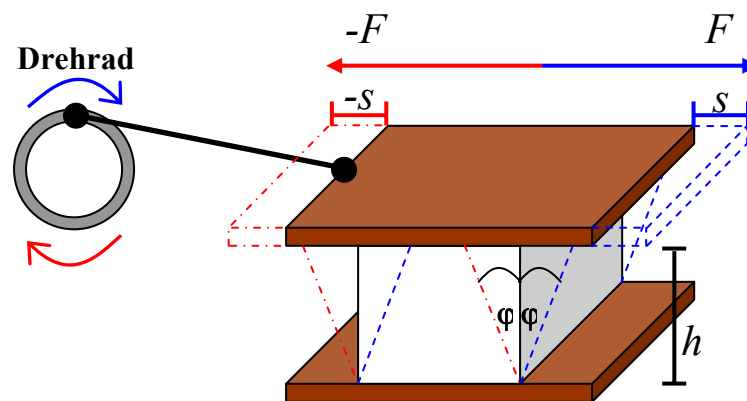


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines Oszillationsversuchs im Zweiplattenmodell. h : Scherspalt, φ : Auslenkwinkel, s : Auslenkung, F : Scherkraft.

Es ergibt sich die Schubspannung zu:

$$\pm \sigma = \pm F/A \quad (9)$$

und die Deformation als

$$\pm \gamma = \pm s/h \quad (10)$$

a) Der idealelastische Fall

Dreht sich das Rad nun um 90° , wird die Auslenkung maximal positiv, damit nehmen die Deformation und die Schubspannung einer idealelastischen Probe maximal posi-

tive Werte an, während die Scherrate an diesem Punkt gleich Null ist. Bei 180° befindet sich die Scherplatte in der Ausgangsstellung und die Deformation sowie die Schubspannung sind Null, hier ist die Scherrate maximal. Eine weitere Drehung liefert die analogen negativen Werte.

b) Der idealviskose Fall

Für eine 90°-Drehung bei einer idealviskosen Probe sind Scherrate und Schubspannung gleich Null, während die Deformation maximal positiv ist. Bei 180° ist die Deformation gleich Null, während die Schubspannung und die Scherrate maximal negativ sind. Auch in diesem Fall liefert eine weitere Drehung die analogen Werte mit umgekehrten Vorzeichen.

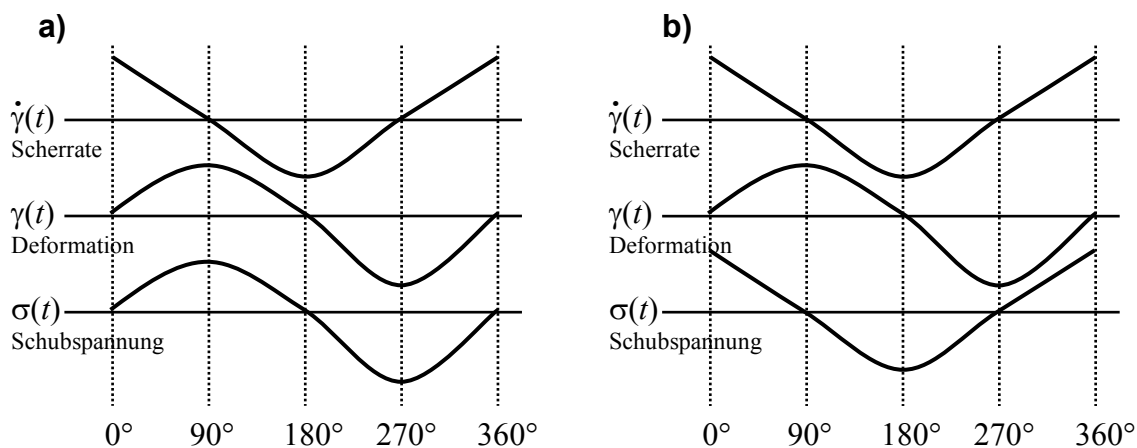


Abbildung 7: Verlauf Sinus- bzw. Cosinus-Kurven der Deformation, der Schubspannung und der Scherrate einer a) idealelastischen und b) einer idealviskosen Probe.

Aus diesen Ergebnissen folgt:

$$\sigma(t) = G^* \cdot \gamma(t) \text{ (idealelastisch)} \quad (11)$$

mit G^* : komplexes Schubmodul

$$\sigma(t) = \eta^* \cdot \dot{\gamma}(t) \text{ (idealviskos)} \quad (12)$$

mit η^* : komplexe Viskosität.

Dynamische Messungen liefern Informationen über viskoelastische Eigenschaften eines Materials. Dazu wird die Probe einer sich periodisch (sinusartig) ändernden Spannung (oder Dehnung) der Amplitude σ_0 mit einer bestimmten Kreisfrequenz ω (rad s^{-1}) ausgesetzt.

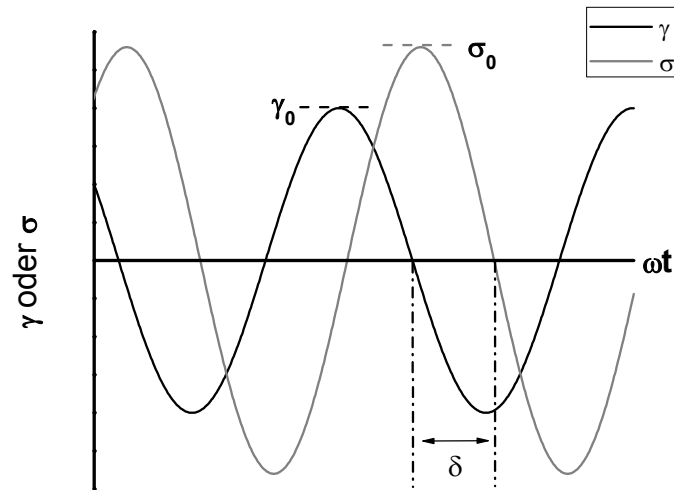


Abbildung 8: Dehnung und Spannung als Funktion der Zeit für ein viskoelastisches Material bei mechanisch dynamischer Beanspruchung sowie Veranschaulichung des Verlustwinkels δ .

Es existiert ein maximaler Wert der Spannung (oder Dehnung) der bei einer bestimmten Kreisfrequenz auf eine Probe ausgeübt werden kann, bevor die Struktur der Probe zerstört wird (Nichtgleichgewichtszustand). Dieser Wert definiert die obere Grenze des linear viskoelastischen Bereichs (LVB). Nur innerhalb des LVB können die viskoelastischen Eigenschaften eines Materials unter Gleichgewichtsbedingungen gemessen werden (vgl.: Abbildung 11).

Für die periodische Auslenkung gilt:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t), \quad (13)$$

mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$.

Die oszillierende Bewegung verursacht eine zeitlich variierende Schubspannung mit einer Phasendifferenz δ

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (14)$$

Diese Phasendifferenz δ (auch als Verlustwinkel bezeichnet) gibt an, wie weit die Dehnung hinter der Spannung hinterherhinkt. Der Verlustwinkel nimmt immer Werte zwischen 0 und $\pi/2$ an ($0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$). Bei $\delta = 0^\circ$ zeigt die Probe idealelastisches Verhalten und bei $\delta = 90^\circ$ idealviskoses Verhalten.

Der Speichermodul G' und der Verlustmodul G''

Aus δ können der Speichermodul $G'(\omega)$ und der Verlustmodul $G''(\omega)$ bestimmt werden:

$$G' = \frac{\sigma_A}{\gamma_A} \cos \delta, \quad G'' = \frac{\sigma_A}{\gamma_A} \sin \delta \quad (15)$$

G' und G'' hängen von den viskoelastischen Eigenschaften des Materials ab. *Der Speichermodul G' beschreibt das elastische Verhalten der Probe.* Er ist ein Maß für die während des Scherprozesses im Probenmaterial gespeicherte Deformationsenergie. Diese Energie steht dem System zur Verfügung und ist Triebkraft zur Rückdeformation. *Der Verlustmodul G'' beschreibt das viskose Verhalten der Probe.* Er ist ein Maß für die während des Scherprozesses verbrauchte und damit verlorene Energie. Sie wird durch Änderungen an der Probenstruktur verbraucht oder an die Umgebung (z.B.: als Wärme) abgegeben.

Der komplexe Schubmodul

G' und G'' stellen den Real- und Imaginärteil des komplexen Moduls G^* dar:

$$G^* = G' + iG'' \quad (16)$$

Die Phasendifferenz δ ergibt sich aus dem Verhältnis von G'' und G' :

$$\tan \delta = G'' / G' \quad (17)$$

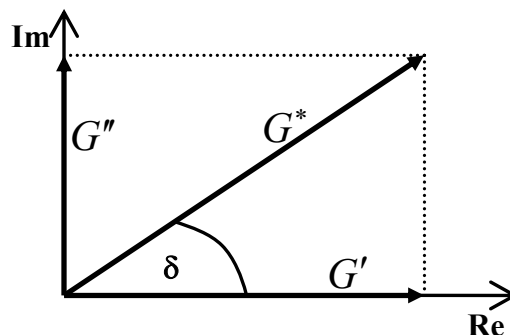


Abbildung 9: Vektordarstellung des komplexen Schubmoduls G^* das sich aus dem Realteil G' und dem Imaginärteil G'' zusammensetzt.

Die komplexe Viskosität

Zudem wird eine komplexe Viskosität folgendermaßen definiert:

$$\eta^* = \eta' + i\eta'' \quad (18)$$

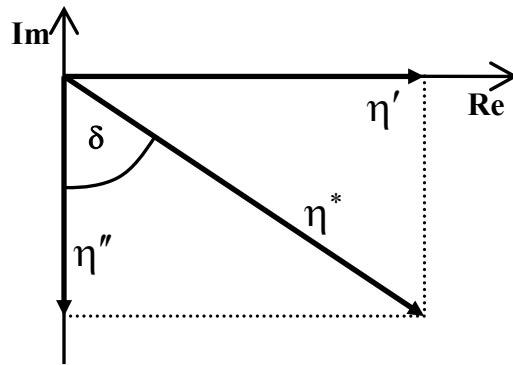


Abbildung 10: Vektordarstellung der komplexen Viskosität η^*

Der Realteil und der Imaginärteil der komplexen Viskosität sind verknüpft mit dem Speicher- und dem Verlustmodul über:

$$\eta' = \frac{G''}{\omega} = \frac{\sigma_A}{\gamma_A \omega} \sin \delta \quad \text{bzw.} \quad \eta'' = \frac{G'}{\omega} = \frac{\sigma_A}{\gamma_A \omega} \cos \delta \quad (19)$$

Für den Betrag der komplexen Viskosität gilt:

$$|\eta^*| = \sqrt{(\eta')^2 + (\eta'')^2} \quad (20)$$

Setzt man Gleichungen 19 in Gleichung 20 ein, folgt:

$$|\eta^*| = \sqrt{\left(\frac{G''}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{G'}{\omega}\right)^2} = \frac{\sqrt{(G'')^2 + (G')^2}}{\omega} = \frac{|G^*|}{\omega} \quad (21)$$

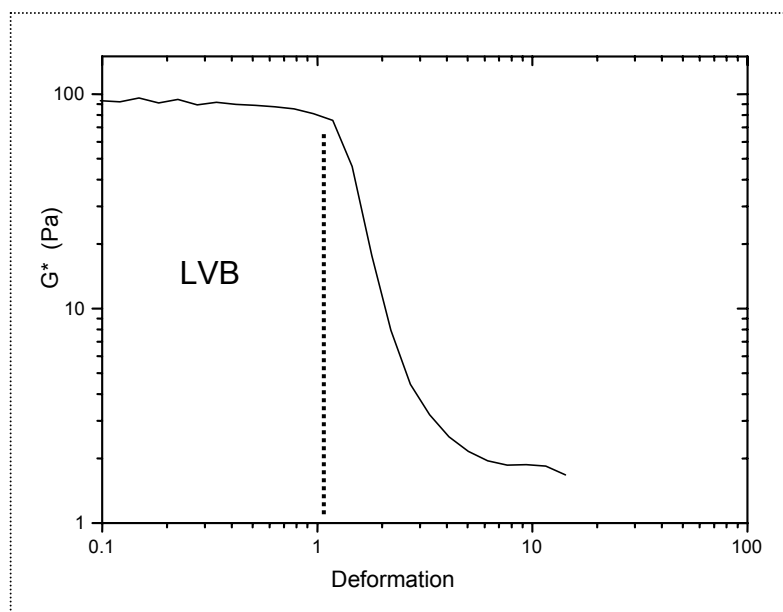


Abbildung 11: Auftragung des komplexen Moduls G^* gegen die Deformation. Im linear viskoelastischen Bereich (LVB) ist der Modul unabhängig von der Deformation.

Die Cox-Merz Regel

Die Cox-Merz Regel stellt eine Verbindung zwischen linearen (erhalten aus dynamischen Messungen) und nicht linearen (erhalten aus statischen Messungen) viskoelastischen Eigenschaften her. Diese Regel gilt oft bei Lösungen mit verschlauften Polymerketten.

Die Scherviskosität η stimmt, bei gleicher Scherrate und Kreisfrequenz, relativ gut mit dem Betrag der komplexen Viskosität $|\eta^*|$ überein. Diese Übereinstimmung wird als Cox-Merz Regel bezeichnet.

$$\eta = |\eta^*| \quad \text{für } \dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)} = \omega \text{ (rad/s)} \quad (22)$$

Das Maxwell-Modell

Diese rheologischen Eigenschaften können mit dem so genannten Maxwell-Modell beschrieben werden, welches im Folgenden erläutert wird.

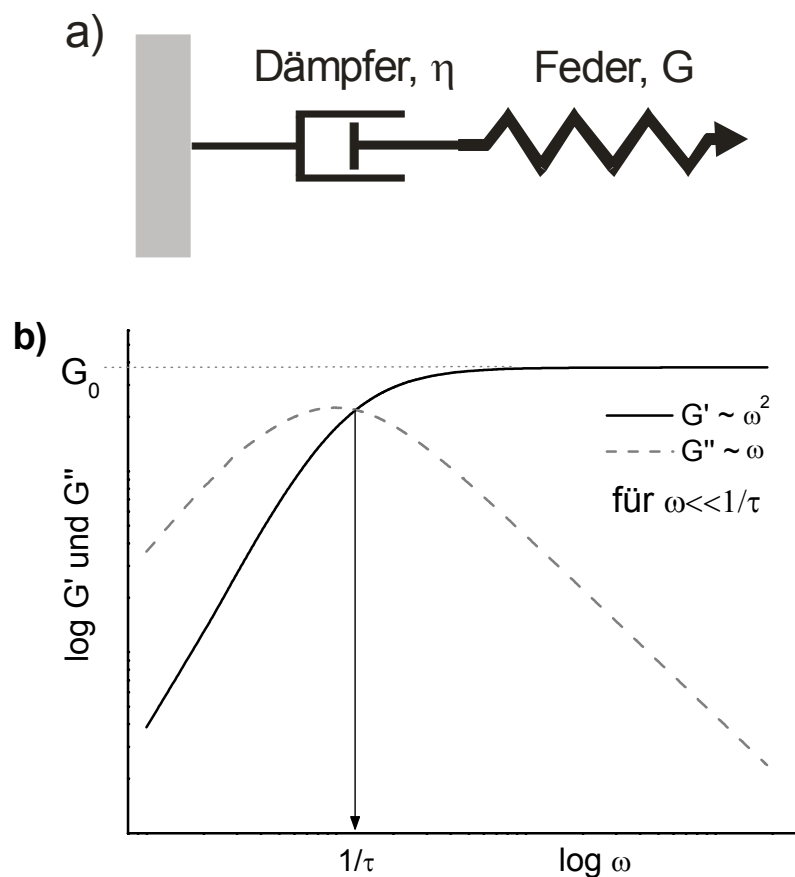


Abbildung 12: a) Darstellung des Maxwell-Modells mit Dämpfer (viskose Eigenschaft) und Feder (elastische Eigenschaft). b) Verlauf des Speicher- und Verlustmoduls (G' und G'') beim Maxwell-Modell.

Abbildung 12a) zeigt eine schematische Darstellung des Maxwell-Modells. Dieses Modell wird zur Beschreibung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten verwendet (z.B.: Ketchup). Es ist aus einer Hookschen Feder (für die elastischen Eigenschaften) und einem Newtonschen Dämpfer (für die viskosen Eigenschaften) in Reihe zusammengesetzt. In diesem Modell gilt für G' und G'' als Funktionen von ω :

$$G'(\omega) = G_0 \frac{(\omega\tau)^2}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (23)$$

$$G''(\omega) = G_0 \frac{(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (24)$$

mit G_0 dem Plateaumodul und τ der Relaxationszeit. In Abbildung 12b) ist ein typisches Spektrum von G' und G'' als Funktionen von ω gezeigt. Bei einem idealen Festkörper gilt für den Speichermodul $G'(\omega) = G_0$ und für den Verlustmodul $G''(\omega) = 0$, während für eine ideale Flüssigkeit $G'(\omega) = 0$ und $G''(\omega) = \eta\omega$ gilt.

Die Relaxationszeit erhält man aus dem Schnittpunkt der Kurven für G'' mit G' . Die Relaxationszeit τ und der Plateaumodul G_0 stehen mit der Nullscherviskosität η_0 in folgendem Zusammenhang:

$$\eta_0 = \tau G_0. \quad (25)$$

Die viskoelastischen Eigenschaften von Festkörpern (z. B.: Silikongummi) lassen sich besser mit dem Kelvin-Voigt Model beschreiben. Dieses wird im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt.

Das Kelvin-Voigt Modell

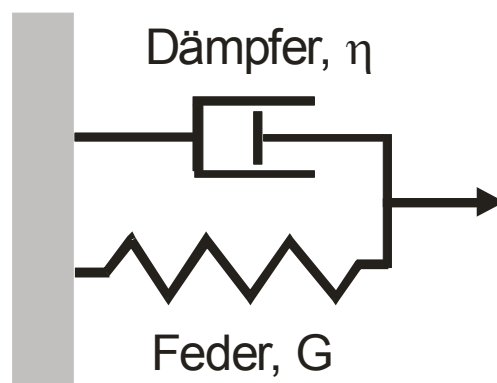


Abbildung 13: Darstellung des Kelvin-Voigt-Modells mit Dämpfer (viskose Eigenschaft) und Feder (elastische Eigenschaft).

Hier sind die Feder und der Dämpfer, im Gegensatz zum Maxwell-Modell, parallel angeordnet. Wird hier eine Dehnung angelegt ist die Deformation beider Komponenten gleich groß. Im Gegensatz um Maxwell-Model wird hier die Deformation der Feder durch den parallel eingebauten Dämpfer begrenzt.

Relaxation wurmartiger Mizellen

Die viskoelastischen Eigenschaften mäßig konzentrierter Lösungen wurmartiger Mizellen ähneln denen von Polymerlösungen. Das Spannungsrelaxationsverhalten solcher Systeme zeigt allerdings einen bemerkenswerten Unterschied. Im Gegensatz zu Polymeren, die eine feste Größe (Polymerisationsgrad) haben, können wurm-artige Mizellen spontan an beliebiger Stelle aufbrechen und mit einer anderen Mizelle rekombinieren. Die Relaxationszeit wurmartiger Mizellen wird durch zwei Zeitskalen beschrieben. Zum einen durch die mittlere Lebenszeit τ_b (Zeit, die eine Mizelle der mittleren Gesamtlänge L benötigt, um in zwei Teile zu zerbrechen) und zum anderen durch die Reptationszeit τ_{rep} . Wenn $\tau_b < \tau_{rep}$ ist, verhält sich die Lösung entsprechend dem Maxwellmodell mit einer Relaxationszeit τ und einem Plateaumodul G_0 . Diese Relaxationszeit wird durch eine neue Zeitskala gegeben:

$$\tau = \sqrt{(\tau_b \tau_{rep})}, \quad (26)$$

welche das Relaxationsverhalten beschreibt. Der Plateaumodul hängt nicht von Relaxationsprozessen ab. Er ist ein Maß für die Netzwerkdichte.

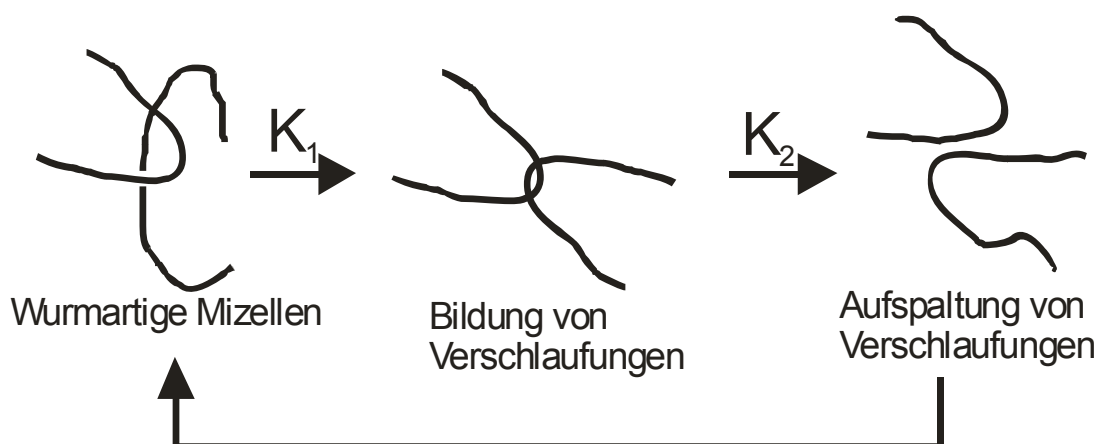


Abbildung 14: Schematische Darstellung der kinetischen Prozesse zwischen wurmartigen Mizellen.

6. Zum Experiment

Proben:

Die Proben bestehen aus einer wässrigen Tensidlösung (ionisch) und einem Salz.

Jede Gruppe misst und vergleicht zwei Proben:

Probe 1:

Cetylpyridinium Chlorid (CPyCl), $C_D = 100 \text{ mM}$.

Natriumsalicylate (NaSal), $C_S = 60 \text{ mM}$

Probe 2:

Cetylpyridinium Chlorid (CPyCl), $C_D = 100 \text{ mM}$.

Natriumsalicylate (NaSal), $C_S = 250 \text{ mM}$

Versuchsdurchführung:

Alle Messungen werden an einem Rheometer (Bohlin Instruments, VOR) mit Zylindergeometrie bei 25°C durchgeführt.

a) stationäres Fließen:

Messen Sie die Fließkurve jeder Probe.

b) dynamische Messung 1:

Messen sie für jede Probe G' und G'' als Funktion der Deformation (γ) bei zwei Frequenzen (1 und 10 Hz). Wählen Sie einen Wert für die Deformation der bei beiden Proben im linear viskoelastischen Bereich (LVB) liegt.

c) dynamische Messung 2:

Messen sie für jede Probe G' und G'' als Funktion der Frequenz bei gegebener Dehnung (aus Messung 1).

Ergebnisse und Diskussion:

Die folgenden Auftragungen sollen für jede Probe mit doppellogarithmischer Skalierung gezeichnet werden.

- Tragen Sie die Scherviskosität η (Pa s) gegen die Scherrate $\dot{\gamma}$ (1/s) auf. Vergleichen Sie die beiden Kurven und bestimmen Sie mittels der Cross- und Carreaumodells die Nullscherviskositäten und κ .
- Tragen Sie G' und G'' für jede Frequenz (1Hz und 10 Hz) gegen die Deformation (γ) auf. Markieren Sie den Wert der gewählten Dehnung. Kommentieren Sie den Einfluss der Frequenz auf die viskoelastischen Eigenschaften der Proben.

- c) Tragen Sie G' und G'' gegen die Winkelfrequenz auf. Fitten Sie das Maxwell-Modell an die Daten an und bestimmen Sie die Relaxationszeit τ und den Plateaumodul G_0 . Berechnen sie daraus die Nulsherviskosität. Vergleichen und kommentieren Sie die Werte der beiden Proben miteinander. Diskutieren sie den Effekt des Salzes auf die viskoelastischen Eigenschaften der untersuchten wurmartigen Mizellen.
- d) Tragen Sie den Verlustmodul als Funktion des Speichermoduls $G''=f(G')$ auf. (! lineare Skalierung der Achsen !). Vergleichen Sie die experimentellen Daten mit den theoretischen Daten des Maxwell-Modells aus ihrem Fit. Es ergibt sich eine halbkreisförmige Kurve (Cole-Cole-Plot). Abweichungen von dieser idealen Kurvenform deuten darauf hin, dass das verwendete Modell zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens ungeeignet ist. Diskutieren Sie, ob das Maxwell-Modell für die untersuchten Proben anwendbar ist!
- e) Tragen Sie die komplexe Viskosität als Funktion der Winkelfrequenz und die Viskosität als Funktion der Scherrate in einem Diagramm auf. Entscheiden Sie ob die Cox-Merz Regel bei dem untersuchten System gilt oder nicht.

Literatur:

1. <http://scienceworld.wolfram.com/>
2. C.W. Macosko, Rheology: Principles, Measurements and Applications, VCH 1994.
3. T. Mezger, Das Rheologie-Handbuch, Vincentz 2000.
4. J.D. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, 3rd ed. Wiley 1980.
5. For the viscoelastic properties of the worm-like micellar solutions, see H. Rehage, H. Hoffmann, Molecular Physics, 1991, 74(5), 933-973.
6. Fig.3-1. http://www.jstage.jst.go.jp/article/rheology/28/2/67/_pdf
Fig.3-8. http://www.jstage.jst.go.jp/article/rheology/28/2/61/_pdf