Über Scherungswellen in koagulierten Gelatinelösungen.

Von R. Reiger.

Aus dem physikalischen Institut der Universität Erlangen.

Eingegangen am 3. November 1909.

Koagulierte Gelatinelösungen zeigen ein in mancher Hinsicht interessantes elastisches Verhalten. Von dem kleinen Wert des Scherungsmoduls, wie er bei geringem Prozentgehalt an Gelatine[1]) beobachtet wird, soll im folgenden Gebrauch gemacht werden, um die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Scherungswellen im kontinuierlichen elastischen Medium mit Hilfe einer Sonde nach einer von mir früher gegebenen Methode[2]) zu bestimmen. Da für diesen Fall die Theorie gibt

$$v = \sqrt{\frac{N}{\varrho}},$$

so ist einerseits die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v, andererseits der Scherungsmodul N und die Dichte ϱ zu bestimmen.

1. Bestimmung des Scherungsmoduls. — Der Scherungsmodul wurde nach einer von mir früher gegebenen Methode[3]) bestimmt, die eine Modifikation einer von Schwedoff gegebenen Methode[4]) darstellt.

---

[1]) Th. S. Schwedoff. Journ. d. Phys. 8 (1889), 341; R. Reiger. Sitzungsber. d. phys.-med. Soz. in Erlangen 38 (1906), 252; C. Rohloff u. Shinjo. Phys. Zeitschr. 8 (1907), 442.

[2]) R. Reiger. Sitzungsber. d. phys.-med. Soz. in Erlangen 40 (1908), 160; vgl. auch R. Reiger und P. Lampe a. a. O., S. 167.

[3]) a. a. O. 38, 252.

[4]) Schwedoff ermittelt den Scherungsmodul auf statischem Wege, indem er z. B. dem Gefäß A (Fig.) eine Drehung erteilt. Dabei ist die Drehung des Gefäßes und des Fadens zu bestimmen.

Der Raum zwischen den beiden konzentrischen Gefäßen A und B ist mit Gelatinelösung gefüllt. Es sei

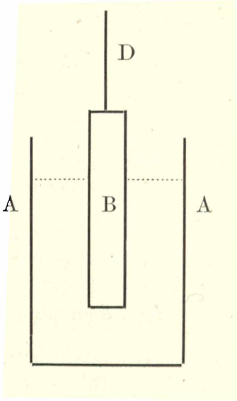
f die Direktionskraft des Aufhängedrahtes D von B,

$k = N\varkappa$ die Direktionskraft der Gelatinelösung, deren Modul N ist,

T und τ die Schwingungsdauern unter dem Einfluß der Direktionskräfte f und $f + k$,

K das Trägheitsmoment des Systems und

K' die Vermehrung des Trägheitsmomentes beim Mitschwingen der Gelatine, dann gilt die Gleichung



$$\left\{\frac{T^2}{\tau^2}\left(1 + \frac{K'}{K}\right) - 1\right\}\frac{f}{\varkappa} = N.$$

Dabei läßt sich $1 + K'/K$ dadurch bestimmen, daß man das Trägheitsmoment des schwingenden Systems ohne Gelatine und mit Gelatine nach vollkommener Koagulation um denselben Betrag vermehrt. Sind $T_1\,\tau_1$ und $T_2\,\tau_2$ die Schwingungsdauern ohne und mit Zusatzgewichten, so ergibt sich:

$$1 + \frac{K'}{K} = \frac{T_2^2 - T_1^2}{T_1^2}\,\frac{\tau_1^2}{\tau_2^2 - \tau_1^2}.$$

Die Konstante $f/\varkappa$ kann dadurch ermittelt werden, daß der Raum zwischen den beiden Gefäßen mit einer Flüssigkeit von dem Reibungskoeffizienten η gefüllt, und dem äußeren Gefäß eine Winkelgeschwindigkeit ψ erteilt wird. Ist die dadurch bei dem Draht hervorgerufene Torsion δ, so ist

$$\eta\,\varkappa\,\psi = f\,\delta.$$

Bei den im folgenden mitgeteilten Versuchen war das innere Gefäß ein vernickelter Messingzylinder, auf dem sich zwei eingeritzte Marken befanden, die ermöglichten, dieselbe relative Lage der beiden Zylinder bei den verschiedenen Versuchen zu erzielen. Die obere Marke wurde mit dem Rande des Gefäßes A zur Deckung gebracht, und bis zu der zweiten Marke wurde die Flüssigkeit eingefüllt.

Zur Kompensierung des Auftriebs war der Zylinder A mit Wasser gefüllt. Die dadurch bedingte Dämpfung der Schwingung

war klein. Die Achsen der beiden Gefäße mußten vertikal gestellt und zur Deckung gebracht werden können. Zu diesem Zweck stand das äußere Gefäß auf einem Tisch mit drei Stellschrauben und an dem Gehänge war eine Horizontierungsvorrichtung angebracht, die aus zwei Messingplatten bestand, die durch drei Schrauben und Federn miteinander verbunden waren.

Auch bei der Bestimmung von $f/\varkappa$ wurde darauf geachtet, daß die Drehungsachse vertikal stand und mit der Drehungsachse des Gehänges zusammenfiel.

2. Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit. — Die Erregerplatte hatte einen Durchmesser von 15 cm. Die Sonde befand sich in einem Abstand von 12 cm von der Platte. Zu der Einstellung war an der Sonde eine Marke angebracht, die mit dem unteren Niveau der Platte zur Deckung gebracht wurde.

Ein Vorversuch zeigte, daß im Anfangsstadium der Koagulation nach der dynamischen Methode bereits ein Nachweis der Elastizität möglich ist. Das System zur Bestimmung des Moduls führt Schwingungen aus, die zwar stark gedämpft sind, für die aber bereits die Schwingungsdauer kleiner als die Relaxationszeit ist, wie die Bewegung der Sonde in dem anderen Apparate zeigt. Sie ist in diesem Falle ganz dieselbe wie bei einer reinen Flüssigkeit, und läßt erkennen, daß eine starke Absorption im Innern stattfindet. Mit fortschreitender Koagulation nimmt die Absorption ab. Die Bewegung der Sonde erfolgt aber noch wie bei Flüssigkeiten. So konnte für $\beta = 0{,}095$ und $v = 1{,}8$ cm/sec noch eine regelmäßige Bewegung der Sonde beobachtet werden, obwohl in diesem Falle die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im wesentlichen durch die Elastizität bestimmt ist, da bei der verwandten Schwingungsdauer $\tau = 4{,}42$ sec die Größe β^2 gegen $4\pi^2/\tau^2 v^2$ [1]) bereits zu vernachlässigen ist. Bei den unmittelbar folgenden Beobachtungen machte sich allerdings bereits ein Einfluß der reflektierten Welle geltend.

Es konnte daher im folgenden die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nicht aus der Zeitdifferenz zweier aufeinanderfolgender Umkehrpunkte ermittelt werden, denn ehe dieser Umkehrpunkt bei der Sonde erreicht wurde, traf bereits die reflektierte Welle ein.

---

[1]) Vgl. Formel 6 diese Berichte **40**, 162.

Die Ablenkung der Erregerplatte aus der Gleichgewichtslage geschah durch einen Elektromagneten. Es wurde die Zeitdifferenz bestimmt, die zwischen dem Eintritt der Bewegung für Erreger und Sonde verstrich. Die Messungen sind dabei allerdings mit kleinerer Genauigkeit als bei Flüssigkeiten auszuführen, aber die Art der Messung bei Flüssigkeiten setzt voraus, daß die gesamte fortschreitende Bewegung in der Flüssigkeit absorbiert wird, ehe sie den Boden des Gefäßes erreicht, und diese Bedingung ist für Gelatinelösungen nur im Anfangsstadium der Koagulation erfüllt.

3. Herstellung der Gelatinelösungen. — Bei der Wahl der Konzentration der Gelatinelösung für den Versuch spielt die Temperatur, bei der die Beobachtung angestellt wird, eine große Rolle. Es zeigt sich nämlich, daß bei Konzentrationen, bei denen bei tieferer Temperatur eine Koagulation eintritt, bei höherer Temperatur selbst nach einigen Tagen keine Koagulation zu beobachten ist.

Da durch starke Erwärmung[1]) die Koagulationsfähigkeit herabgesetzt wird, so wurde die Gelatine bei maximal 45° gelöst. Unmittelbar nach der Lösung wurde die Masse auf Zimmertemperatur abgekühlt. Dies konnte für die gesamte Flüssigkeitsmenge unter ständigem Umrühren in einem Wasserbad, das durch ständigen Zufluß von kaltem Wasser konstant gehalten wurde, in ca. einer halben Stunde erreicht werden. Dann wurde die Lösung in die Apparate gefüllt.

Diese Maßnahme war notwendig, da infolge der verschiedenen Menge der Substanz (12 l und 1,5 l) in beiden Gefäßen die Abkühlungszeit eine verschiedene war. Die beiden Versuche geben aber nur dann vergleichbare Werte, wenn die Vorgeschichte dieselbe ist und die Temperatur in beiden Fällen denselben Wert besitzt. Um ein Verdunsten von Wasser an den oberen Schichten zu verhindern, wurde eine Schicht von Paraffinöl aufgegossen.

4. Verhalten der Gallerte beim Strömen. — Die zu den Versuchen verwandte Gallerte zeigte gegen kleine Gestaltsänderungen die Eigenschaften eines vollkommen elastischen Körpers, zeigte aber insofern eine Ähnlichkeit mit einer Flüssigkeit, als sie wie eine solche sich mit

[1]) E. Fraas, Wied. Ann. 53 (1894), 1074.

einer Pipette ansaugen ließ und dabei die Wände vollkommen benetzte. Man konnte daher daran denken, den Koeffizienten der inneren Reibung einer solchen Gallerte durch Strömen durch Kapillaren wie bei einer Flüssigkeit zu bestimmen. Ich habe einen solchen Versuch ausgeführt. Das Ausflußgefäß war dem von Ostwald ähnlich[1]). Die Gelatine wurde durch eine Pipette eingefüllt und durch eine Wasserstrahlpumpe hochgesaugt. Bei der Strömung zeigte sich nun die merkwürdige Erscheinung, daß im Anfang ein sehr rasches Strömen der Substanz zu beobachten war, das aber immer langsamer erfolgte. Die Erscheinung ist dadurch zu erklären, daß durch das rasche Hochsaugen der Zusammenhang zwischen der Gelatine gelockert wird. Es findet daher nicht ein Strömen wie bei einer Substanz mit innerer Reibung statt, bei der die äußerste Schicht an der Gefäßwand haftet, sondern ein Gleiten von Gelatine an Gelatine. Allmählich vollzieht sich ein Ausheilungsprozeß im Innern der Gelatine, ähnlich wie dies bei geritzten Gläsern von Piccard[2]) beobachtet wurde, und dann erfolgt ein Strömen wie bei einer Flüssigkeit. Betrachtet man nach erfolgtem Ausfluß des Flüssigkeitsvolumens die Wand des Gefäßes, so beobachtet man an der Wand im oberen Teile, so lange ein rasches Ausströmen stattgefunden hat, Trümmer von unregelmäßig gestalteter Gallerte. Die Substanzschicht wird weiter unten dünner und regelmäßiger und schließlich ist nur noch eine dünne benetzende Schicht vorhanden, wie sie bei jeder benetzenden Flüssigkeit beobachtet wird[3]). Dies kann als eine Bestätigung des oben ausgeführten angesehen werden.

Durch diese Beobachtung finden auch Versuche von Schwedoff[4]) eine Erklärung, die nach der Methode von Couette[5]) und Brodmann[6]) eine Abhängigkeit der inneren Reibung von Gelatine von der Rotationsgeschwindigkeit des Gefäßes ergaben,

---

[1]) W. Ostwald, Hand- und Hilfsbuch zur Ausführung physikochemischer Messungen. Leipzig 1893. S. 195.

[2]) J. Piccard. Ber. d. deutsch. chem. Ges. 34 (1901), 3625.

[3]) Zerstört man die Oberfläche einer solchen Gallerte, so zeigen sich auch nach langer Zeit Abweichungen von einer Horizontalebene.

[4]) Th. S. Schwedoff. Journ. d. Phys. 9 (1890), 34.

[5]) M. Couette. Ann. ch. et phys. [6] 21 (1890), 433. — Journ. d. Phys. [2] 9 (1890), 560.

[6]) C. Brodmann. Wied. Ann. 45 (1891), 159.

während die für die übrigen Flüssigkeiten nicht der Fall ist. Sowie eine gewisse Grenze der Deformationsgeschwindigkeit überschritten wird, findet ein Zerreißen der Gelatine im Innern statt und damit ein Gleiten von Substanz an Substanz. Die Methode mißt in diesem Fall keine Reibungskoeffizienten mehr.

5. Prüfung der Formel $v = \sqrt{N/\varrho}$. — Die Elastizität von Gelatinelösungen ändert sich im Verlauf des Koagulationsprozesses[1]). Die Versuche zur Prüfung der Formel $v = \sqrt{N/\varrho}$ wurden daher in der Weise angestellt, daß zunächst die Schwingungsdauer τ für das Gehänge A (Fig.), dann die Zeitdifferenz (t) zwischen Beginn der Deformation und Eintreffen bei der Sonde bestimmt wurde und dann wieder die Schwingungsdauer des Gehänges. Aus den beiden beobachteten Schwingungsdauern wurde das Mittel genommen. Bei den letzten Versuchen waren bereits innerhalb längerer Zeit keine merklichen Änderungen von v und N zu beobachten, es konnte daher für N und v aus einer Reihe von Beobachtungen ein Mittelwert bestimmt werden.

Versuch	$\frac{\tau}{2}$	t sec.	$\sqrt{\frac{N}{\varrho}}$	v	$v\sqrt{\frac{\varrho}{N}}$
1	3,34	4,8	2,04	2,50	1,23
2	2,80	3,9	2,46	3,08	1,25
3	2,37	3,4	2,93	3,53	1,20
4	1,92	2,7	3,64	4,44	1,22
5	1,66	2,3	4,22	5,22	1,24
6	1,50	2,0	4,69	6,00	1,28
7	1,16	1,7	6,07	7,06	1,16
8	0,81	1,15	8,72	10,44	1,20
9	0,67	1,0	10,56	12,0	1,14
10	0,48	0,7	14,74	17,14	1,16

Die ersten fünf Beobachtungen sind in einem Zeitintervall von ungefähr einer halben Stunde angestellt. Man sieht daraus den Vorzug der dynamischen Methode gegen die statische im ersten Stadium der Koagulation. Sie gestattet eine rasche und

[1]) E. Fraas, l. c. — Über die Bestimmung der Koagulationsgeschwindigkeit aus dieser zeitlichen Änderung s. R. Reiger, diese Ber. 38 (1906), 252 und P. Lampe. Dissertation. Erlangen 1908.

sichere Beobachtung, während bei der statischen Methode die Erscheinungen der elastischen Nachwirkung sehr viel stärker hervortreten.

Die 6., 7., 8., 9. und 10. Messung wurden ca. 1, 2, 3, 8 und 20 Stunden später angestellt als die 5. Messung.

Die Temperatur betrug 16°. Die Dichte der Gelatinelösung war 1,004. Für die Schwingungsdauer ohne Substanz wurde $\tau/2 = 11{,}57$ sec. gefunden. In der letzten Reihe ist $v \cdot \sqrt{\varrho/N}$ gegeben, das nach der Theorie 1 sein müßte, während es nach dem Versuch größer als 1 ist. Die Erklärung dafür geben Beobachtungen über die Ausbreitung scherender Deformationen in Flüssigkeiten, die an anderer Stelle mitgeteilt werden sollen. Diese zeigen, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit wächst, wenn in der von der schwingenden Platte ausgehenden Störung die Winkelgeschwindigkeit nicht für alle Teilchen einer Ebene dieselbe ist, d. h. wenn die Welle keine ebene ist. Unser Versuch, läßt es also als wahrscheinlich erscheinen, daß ebene Scherungswellen sich im kontinuierlichen Medium mit der Geschwindigkeit $\sqrt{N/\varrho}$ fortpflanzen.

6. Über die Ausbreitung von Longitudinalwellen. — Ich möchte hier wenigstens kurz darauf hinweisen, daß es mit Gelatinelösungen möglich ist, eine weitere theoretische Folgerung der Elastizitätslehre zu prüfen. Bekanntlich führt die Elastizitätstheorie für Longitudinalwellen im Gegensatz zu den Transversalwellen zu einer verschiedenen Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Stäben und im kontinuierlichen Medium. In Stäben ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch den Modul der Längsdehnung bestimmt oder, wenn wir diesen durch die beiden Hauptmoduln ausdrücken, durch

$$v_1 = \sqrt{\frac{9NC}{\varrho(N+3C)}},$$

wobei N der Scherungsmodul und C der Volummodul ist. Da N für Gelatine klein gegen C ist, so folgt:

$$v_1 = \sqrt{\frac{3N}{\varrho}}.$$

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist klein und in der Tat erwähnt bereits Mach[1]), daß mit Hilfe der Doppelbrechung das langsame Fortschreiten der Deformation in einem Gelatineband zu beobachten ist.

Für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im kontinuierlichen Medium ist

$$v_2 = \sqrt{\frac{C}{\varrho} + \frac{4}{3}\frac{N}{\varrho}},$$

oder, da wieder N gegen C zu vernachlässigen ist,

$$v_2 = \sqrt{\frac{C}{\varrho}},$$

d. h. die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist wie bei Longitudinalwellen in Flüssigkeiten durch den Volummodul bestimmt. Um die Theorie zu prüfen, brauchen wir im Falle der Gelatine nicht ein sehr ausgedehntes Medium, denn es ist klar, daß eine von festen Wänden begrenzte Gelatine sich ähnlich verhalten muß, denn die Bedingung, daß die Substanz im kontinuierlichen Medium an der seitlichen Ausdehnung und Kontraktion verhindert wird, ist hier durch den Unterschied im elastischen Verhalten von Substanz und Wand erfüllt. Bei der großen Geschwindigkeit stößt die direkte Bestimmung von v auf Schwierigkeiten. Man wird daher besser stehende Schwingungen verwenden.

[1]) E. Mach, Optisch-akustische Versuche. Prag 1873. S. 45.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Sozietät zu Erlangen

Jahr/Year: 1909

Band/Volume: 41

Autor(en)/Author(s): Reiger Rudolf

Artikel/Article: Über Scherungswellen in koagulierten Gelatinelösungen 117-124