

d. h. es verhält sich wie eine Kathode: positive Kolloide werden ihrer Ladung beraubt und ausgefällt, während negative Teilchen mit dem Dispersionsmittel, den kapillaren Saugkräften folgend, emporsteigen. Auf diese einfache Art des „Kapillarisierens“ gelingt es, positive und negative Kolloide voneinander zu trennen. In ähnlicher Weise werden positive Kolloide beim Filtrieren gefällt und am Filter zurückbehalten, während negative Sole ungehindert hindurchgehen. Für den Radiochemiker bietet die Kapillaranalyse zwei Vorteile. Erstens gestattet sie eine einfache Trennung positiver und negativer Radiokolloide, zweitens aber eine bequeme Art der Konzentrierung radioaktiver Stoffe. Durch Einäschern des Filterpapiers wird das darauf befindliche radioaktive Produkt auf das kleine Volumen der Asche konzentriert. Godlewski²⁵⁾ war es zuerst aufgefallen, daß bei der Filtration einer Emanationslösung, die die Folgeprodukte (RaA, RaB und RaC) enthält, das Filter außerordentlich aktiv blieb und die von diesem Filter erhaltene Abklingungskurve ganz jener entsprach, die er bei seinen elektrophoretischen Untersuchungen von der Kathode erhielt, wenn er eine Emanationslösung elektrolysierte. Die positiven Produkte, das sind RaB und RaC, sammeln sich am negativ elektrischen Filter an, so wie dies an der Kathode geschieht. — Die von F. Schönbein und F. Goppelsroeder eingeführte Filterstreifenmethode führte zu einem ähnlichen Ergebnis. In der Eintauchzone wird RaB und RaC zurückgehalten, während RaA und der negative Anteil von RaC emporgesaugt wird. RaA steigt allerdings nur wenig hoch, da es sich sehr rasch in das positive RaB umwandelt, das ausgefällt wird. Auf diese Weise konnte also RaC bequem isoliert und durch Einäschern des Filterstreifens konzentriert werden.

4. Konzentrierung der kolloiden Radioelemente durch Fällung mit

²⁵⁾ F. Godlewski, Koll.-Zeitschr. 14, 229 (1914).

anderen Kolloiden. Noch einfacher als durch „Kapillarisieren“ gestaltet sich die Konzentrierung der Radiokolloide dann, wenn man sie mit anderen Kolloiden ausfällt. Positive Kolloide werden durch Zusatz eines negativen, und negative Kolloide durch Zusatz eines positiven Kolloids entladen und ausgefällt. So konnten mit kolloidem Gold oder Platin die negativen Bestandteile, mit kolloidem Arsentrisulfid die positiven Bestandteile eines RaA-, RaB-, RaC-Sols ausgefällt werden. Der große technische Vorteil einer solchen Operation liegt darin, an ganz minimalen Mengen eines fremden Stoffes eine außerordentlich starke Aktivität anzuhäufen. Auch diese Ergebnisse verdanken wir F. Godlewski.

IV. Kolloidchemie der Leuchtfarben. (Leuchtkraft und Dispersitätsgrad.)

Dieses Problem ist gegenwärtig kaum untersucht, hat aber zweifellos eine nicht zu unterschätzende Bedeutung. Es sei nur auf die Arbeit von Baar²⁶⁾ hingewiesen, der das durch die Ra-Strahlung hervorgerufene Leuchten des Zinksulfidschirmes studierte. Bekanntlich wird die Sidotblende im Laufe der Zeit durch die Bestrahlung zerstört. Diese Zerstörung geht nun um so langsamer vor sich, je feiner kristallin das auf dem Schirm aufgetragene Pulver ist. Auch die Leuchtkraft ist eine Funktion des Dispersitätsgrades, da naturgemäß nur das Leuchten der Oberfläche wahrgenommen wird. Doch erreicht die Leuchtkraft bei einem gewissen Verteilungsgrad des Zinksulfids ein Maximum; ist nämlich das Pulver gar zu fein, dann bedingt die dichte Zusammenlagerung der Teilchen ein zu großes Hindernis für die Strahlen und die Leuchtkraft läßt nach in dem Maße, als der Schirm undurchlässiger wird.

Wien, Juli 1920. Technische Hochschule.

²⁶⁾ Baar, Zeitschr. f. angew. Chem. 31, 588 (1918).

Die innere Reibung gelatinierender Lösungen.

Von W. R. Hess.

(Eingegangen am 25. Mai 1920.)

(Aus dem Physiologischen Institut der Universität Zürich. Vorsteher: Prof. W. R. Hess.)

Die vorliegende Arbeit soll einen Ueberblick geben über den Inhalt einiger Publikationen zu dem im Titel niedergelegten Thema. Die hier referierten Untersuchungen hatten ihren Ausgang von der Ausarbeitung einer Methode zur

Bestimmung der Viskosität des Blutes im Jahre 1906¹⁾ genommen. Bei der Einführung der-

¹⁾ W. R. Hess, Viskosität des Blutes und Herzarbeit (Vierteljahrsschr. d. Zürich. Nat. Gesellsch. 1906).

selben in die Praxis zeigte sich eine Diskrepanz der Resultate gegenüber denjenigen mit dem von Determann 1907 angegebenen Blutviskosimeter feststellbaren Werten. Das eigentümliche war dabei die Erscheinung, daß beide Apparate auf dieselbe Testflüssigkeit — destilliertes Wasser — geeicht, in der Kontrolle an andern Flüssigkeiten, z. B. Glycerin-Wassermischung, gut übereinstimmten. So mußte also die Ursache für die Differenzen bei Blut in den Eigenschaften des Mediums selbst vermutet werden; damit war die Anregung zu systematischen Untersuchungen vorerst über das Verhalten der Viskosität des Blutes, dann auch gewisser anderer mehrphasiger Systeme unter verschiedenen Bedingungen gegeben.

Die Mitteilung der Resultate erfolgte mit Rücksicht auf das zu weckende Interesse an der Blutviskosimetrie ausschließlich in medizinischen Zeitschriften^{2) 3) 4) 5)}, so daß es wohl gerechtfertigt ist, an dieser Stelle im Zusammenhang über die auch den physikalischen Chemiker interessierenden Beobachtungen zu referieren.

Seit Abschluß meiner eigenen Untersuchungen wurde das Thema von Rothlin^{6) 7)} aufgenommen und weiter verfolgt. Diese Untersuchungen, ebenfalls in unserm Institut zur Durchführung gelangt, sind hier mit berücksichtigt. In Anbetracht dessen, daß sich als Schlußfolgerung aus den zu referierenden Beobachtungen bestimmte methodische Vorschriften für die Viskosimetrie kolloider Lösungen ergeben, sei eine Beschreibung der benützten Methode vorausgeschickt.

Methodik.

Bei allen unsern Untersuchungen wurde mit dem von mir angegebenen Viskosimeter ge-

²⁾ W. R. Hess, Reibungswiderstand des Blutes und Poiseuille'sches Gesetz (Zeitschr. f. klin. Mediz. 71, Heft 5 u. 6).

³⁾ W. R. Hess, Der Einfluß des Druckes auf den Koeffizienten der Blutviskosität (Berlin. Klin. Wochenschr. 1913, Nr. 5).

⁴⁾ W. R. Hess, Der Strömungswiderstand des Blutes gegenüber kleinen Druckwerken (Arch. f. Anat. u. Physiologie 1912, 197).

⁵⁾ W. R. Hess, Gehorcht das Blut dem allgemeinen Strömungsgesetz der Flüssigkeiten (Arch. f. d. ges. Physiologie 62, 187, 1915).

⁶⁾ E. Rothlin, Ueber die Viskositätsbestimmung bei organischen Kolloiden (Biochem. Zeitschr. 98, 34, 1919).

⁷⁾ E. Rothlin, Kritische Studien über die physikalischen Bedingungen bei der Messung der inneren Reibung des Blutes und dessen Komponenten (Zeitschr. f. klin. Mediz. 1920, 233).

arbeitet und zwar mit dem sogenannten Laboratoriumsmodell, welches gestattet, auf eine bestimmte Versuchstemperatur zwischen 0 und 50° einzustellen. Das Skelett des Apparates ist durch Fig. 1 und nachstehende Erklärung erläutert.

Prinzip des Apparates: Von einem dreischenkligem Rohr aus werden durch eine Glaskapillare hindurch in ein graduiertes Röhrchen die zu untersuchende Flüssigkeit, gleichzeitig durch eine zweite, parallel gelagerte Kapillare in ein zweites graduiertes Röhrchen Wasser angesogen. Da die treibende Kraft von demselben Rohr ausgehend auf beide Flüssigkeiten gleich stark und während derselben Dauer wirkt, so ist bei den gegebenen Dimensionen der Kapillaren das Verhältnis der Durchflussvolumina beider Flüssigkeiten ausschließlich abhängig von dem Verhältnis ihrer Viskositätswerte. Es besteht die Proportion.

$$\frac{\text{Durchflussvolum des Wassers}}{\text{Durchflussvolum des Blutes}} = \frac{\text{Viskosität des Blutes}}{\text{Viskosität des Wassers}}$$

Läßt man die ansaugende Kraft gerade so lange wirken, bis das Durchflussvolumen des Blutes = 1 ist, so ist nach der angeführten Proportion in jenem Zeitpunkt das Durchflussvolum des Wassers ein Maß für das Verhältnis Viskosität der geprüften Flüssigkeit : Viskosität des Wassers, d. i. das Maß für die relative Viskosität der untersuchten Lösung. An dem Stand des Wassermeniskus kann deshalb der gesuchte Viskositätswert direkt abgelesen werden.

Beschreibung des Apparates: Mit einer Skalenplatte sind die zwei Meßröhrchen M_1 und M_2 verbunden, welche einerseits durch das Rohr T unter sich und durch Vermittlung des Schlauches S mit dem Gummiballon Gb in Verbindung stehen; andererseits sind an dieselben je eine Kapillare K_1 und K_2 angeschlossen. Diese letzteren münden in R_1 und R_2 . Glasröhrchen vom Kaliber der erstgenannten M_1 und M_2 . Durch den Hahn H ist die Möglichkeit gegeben, die Kommunikation des Meßröhrchens M_1 mit dem T-Rohr und dadurch auch mit dem Gummiballon aufzuheben. Zwischen Schlauch S und Gummiballon ist das Ventilrohr V eingeschaltet, dessen Inneres mit der Außenluft durch die Oeffnung O kommuniziert.

Die Kapillaren, aus welchen der Apparat zusammengesetzt ist, durchlaufen, wie Abb. 2 zeigt, ein an beiden Enden abgedichtetes weites Glasrohr, den sogenannten Wassermantel (WM), welcher im Versuch mit Wasser von der gewünschten Temperatur gefüllt wird. Der Trich-

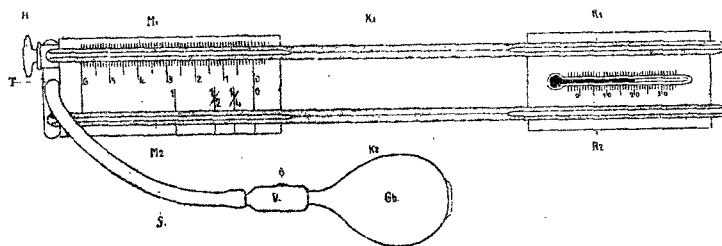


Fig. 1

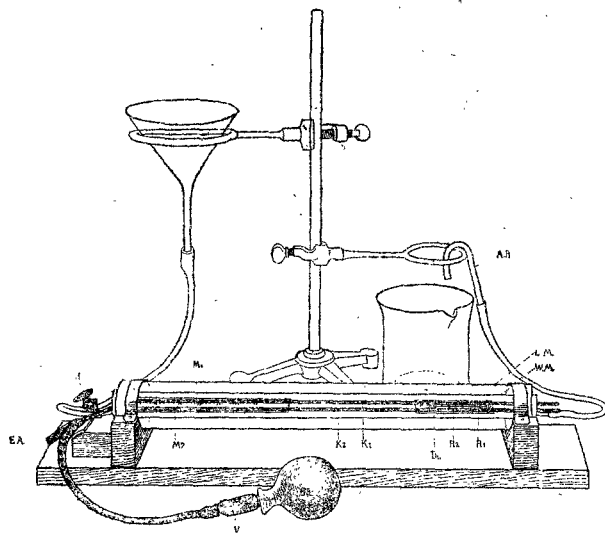


Fig. 2

ter dient dabei als Einguß, das Abflußrohr AR als Ueberlauf, wenn der Wassermantel gefüllt ist. Zur Erleichterung eines Konstanthaltes der Innentemperatur ist der Wassermantel von einer durch ein zweites Glasrohr LM abgeschlossenen Lufthülle umgeben. Das Ganze liegt auf einem Holzlager. Das Stativ für Trichter und Abflußrohr ergänzt die Vorrichtung zur Einstellung der gewünschten Versuchstemperatur. Die Apparatur wird vervollständigt durch Einzelbestandteile, wie ein kleines Gebläse zur Trocknung der Kapillaren und Glaspipetten zur Heranbringung der Versuchsflüssigkeit und des destillierten Wassers an die Mündungen der Apparatenröhrchen. Die Graduierung der Skala hängt davon ab, für welche Flüssigkeit der Apparat gebraucht werden soll. In der üblichen Ausführung ist der Höchstwert der Skala = 6. Saugt man die zu untersuchende Flüssigkeit nur bis zur Marke $\frac{1}{2}$ bzw. $\frac{1}{4}$, so fallen Viskositätswerte bis zu 12 bzw. 24 in den Bereich der Meßbarkeit. Für niedriger visköse Flüssigkeiten kann die Ablesungsgenauigkeit dadurch erhöht werden, daß man die Skala bis zur Marke

2 ansaugt, also die Einheitsstrecke verdoppelt. Der an der Wasserskala abgelesene Wert ist dann natürlich durch 2 zu dividieren⁸⁾.

Der Apparat wird am besten derart plaziert, daß das Licht seitlich von rechts einfällt; es stören so keine Reflexe. Der Hahn muß auf der linken Seite sein. Die Schläuche, welche mit dem Innern

des Wassermantels kommunizieren, erhalten einen Glasrichter bzw. das abgebogene Ausflußröhrchen angesteckt, Trichter wie Abflußrohr kommen ans Stativ, wie aus Abb. 2 ersichtlich ist. Zum Anfüllen des Wassermantels gießt man das Wasser mit der gewünschten Versuchstemperatur in den Trichter, so lange, bis nach Füllung des Viskosimeters der Ueberschuß aus dem Abflußröhrchen in eine untergestellte Schale überfließt. Im Wassermantel wird eine Luftblase zurückbleiben; sie dient uns mit Vorteil als Indikator zur Horizontallagerung des Apparates und gestattet auch durch abwechselndes Heben und Senken des einen Endes des Apparates ein gutes Durchmischen des Inhaltes des Wassermantels. Weicht die Temperatur, bei welcher man die Viskositätsbestimmung vornehmen will, erheblich von der

Temperatur des Untersuchungsraumes ab, so wird sich trotz der schützenden Lufthülle nach einiger Zeit eine Abkühlung bzw. eine Erwärmung im Viskosimeter bemerkbar machen. Durch Zugießen von entsprechend kälterem oder wärmerem Wasser in den Trichter und nachfolgendem Mischen durch abwechselndes Heben des einen und andern Endes des Apparates wird die Abweichung korrigiert. Neben diesem Modus besteht aber auch die Möglichkeit, die Temperatur durch Dauerspeisung des Wassermantels aus einem Thermostaten konstant zu erhalten. Die sich im Innern des Glasmantels ansetzenden Luftbläschen können durch Vorbeistreichenlassen der als Libelle dienenden Luftblase entfernt werden. Will man ihr Auftreten ganz vermeiden, so verwendet man zur Füllung des Wassermantels ausgekochtes Wasser.

Nach Bedienung der Wärmeverrichtung bringe man mittelst einer der beigegebenen Pipetten destilliertes Wasser in den dem Untersucher abgekehrten Kapillarschenkel. Ein leichtes Ansaugen mittelst des Ballons wird das Ueber-

⁸⁾ Der Apparat ist erhältlich bei der Firma E. F. Büchi, opt.-mechan. Werkstätte, Bern.

treten des Wassers aus der Pipette in das Reservoirröhrchen R_1 (Fig. 1) veranlassen, sofern dessen vorstehende Spitze in die Flüssigkeit der Pipette richtig eintaucht. Die Saugwirkung des Ballons kommt so zustande, daß man ihn zuerst preßt, dann mittelst eines Fingers die Oeffnung O des angeschlossenen Ventilstückes V verschließt, um hierauf die Pressung wieder los zu lassen. Der Ballon strebt dabei nach Entfaltung, wodurch er ansaugend wirkt.

Die Füllung der Reservoirröhrchen muß aus einer einzigen zusammenhängenden Flüssigkeitssäule (ohne Luftblasen) bestehen. Nach Entfernen der Pipette von der Spitze wird das Wasser noch soweit eingesogen, daß es anfängt, durch die lange Reibungskapillare hindurch in das Meßröhrchen M_1 überzutreten. Man unterbricht das Saugen und stellt den Hahn quer, sobald der linksseitige Meniskus der Wassersäule den Nullpunkt der Skala erreicht hat. In analoger Weise wird sodann der dem Untersucher zugekehrte Schenkel mit der zu prüfenden Flüssigkeit beschickt und auch hier der Meniskus auf den Nullpunkt der Skala eingestellt. Ist dies erreicht, so wird der quer gestellte Hahn wieder geöffnet, so daß das von neuem einsetzende Saugen des Ballons sowohl auf die zu untersuchende Flüssigkeit als auch auf das als Testflüssigkeit dienende destillierte Wasser wirkt. Man bricht ab, wenn die zu untersuchende Flüssigkeit die Marke 1 erreicht hat. Am Stand des Wassermeniskus lesen wir den gesuchten Viskositätswert ab, am Thermometer die für die Untersuchung maßgebende Temperatur. Sollte die untersuchte Probe eine höhere Viskosität aufweisen, als dem höchsten Skalenwert entspricht, so saugen wir, wie bereits erwähnt, bis zur Marke $\frac{1}{2}$ an. Der an der Wasserskala abgelesene Wert ist dann nur die Hälfte des wirklichen. Wir multiplizieren ihn also mit 2. Haben wir hingegen eine Flüssigkeit mit sehr niedrigem Viskositätswert zur Untersuchung, so lassen wir dessen Meniskus zweckmäßigerweise bis zur Marke 2 vorschreiten. Der an der Wasserskala abgelesene Wert muß durch 2 dividiert werden, um zum gesuchten Wert zu führen. Diese Einbeziehung der zweiten Einheitsstrecke der Skala verschafft uns eine Verminderung der Ablesungsfehler.

Nach vollzogener Ablesung drängen wir den Inhalt beider Meßröhrchen durch Pressung des Ballons wieder zurück. Sehen wir den Wassermeniskus auf O zurück gekehrt, so stellen wir den Hahn H wieder quer. Sodann kann die Untersuchungsflüssigkeit durch Druck vollständig

entleert werden, während das destillierte Wasser für weitere Untersuchungen im Apparat zurückbleibt. Der frischen Verwendung des Apparates muß eine sofortige Reinigung des die zu untersuchende Flüssigkeit aufnehmenden Schenkels vorangehen, wenn es sich nicht um eine Doppelbestimmung am gleichen Untersuchungsobjekt handelt. Die Reinigung wird so durchgeführt, daß man zwei- bis dreimal nacheinander Ammoniak konz. bis über die Marke 2 einsaugt und wieder entleert, wobei natürlich die gleiche Flüssigkeit nur einmal zu verwenden ist. Man wiederholt die Prozedur mit Alkohol abs. und mit Aether. Zum Schlusse wird der Schlauch des dem Apparat beigegebenen Gebläses über die Spitze des Reservoirröhrchens gestülpt und der Aether durch Luftstrom verjagt. Steht eine Wasserstrahlpumpe zur Verfügung, so gestaltet sich die Reinigung und Trocknung dadurch sehr einfach, daß man den Saugschlauch an den Entleerungsansatz (EA) anschließt unter gleichzeitigem Abklemmen des Ballonschlauches. Man kann nun direkt hintereinander Ammoniak, Alkohol, Aether und Luftstrom durch die Kapillaren hindurchpassieren und sich nach der Wasserstrahlpumpe hin entleeren lassen.

Für den Fall, daß Serienuntersuchungen an verschiedenen Lösungen desselben Stoffes durchgeführt werden, kann man von dem beschriebenen Reinigungsmodus Umgang nehmen. Rascher und ebenso zweckdienlich ist hier das dreimalige Vorspülen mit derjenigen Probe, welche hernach zur Untersuchung kommen soll.

Den Schluß der Untersuchung macht die Entleerung des Wassermantels unter Neigen des Apparates nach links. Ein dauerndes Verweilen des Wassers im Mantel könnte event. die Skala schädigen. Aus demselben Grunde sollen Temperaturen über $40-50^\circ$ im allgemeinen nicht zur Anwendung kommen. Selbstverständlich darf nur ganz reines Wasser in den Mantel gelangen, da Verunreinigungen nicht so leicht wieder entfernt werden können.

In allen hier nicht besonders erwähnten Gebrauchsregeln, deren Beobachtung im Interesse der Vermeidung von Störungen und Fehlern ist, besteht volle Uebereinstimmung mit den Vorschriften, welche für das „klinische Modell“⁹⁾ gegeben sind, so daß es genügen möge, wenn hier darauf verwiesen ist.

Die Genauigkeit des Apparates entspricht einer Fehlerbreite von weniger als ein Prozent. Wesentlich ist die Möglichkeit, je nach Bedarf

⁹⁾ Vereinfachtes Blutviskosimeter; vgl. Münchn. Med. Wochenschr. 1907, Nr. 32.

mit höherem oder niederem Drucke zu arbeiten durch Anwendung verschieden starker Saugballons. Wenn es darauf ankommt, die Druckbedingungen feiner abstufend zu variieren, so geschieht dies durch Kombination mit einer besonderen Vorrichtung, wie ich sie a. a. O.¹⁰⁾ beschrieben habe. Die analoge Versuchsanordnung verwandte auch Rothlin¹¹⁾. Für unser spezielles Thema, das Studium des Einflusses, welcher der bei der Transpiration verwendete Druck auf das Resultat der Viskositätsmessung ausübt, ist die genannte Ergänzung selbstverständlich notwendig.

Resultate.

Die Resultate, welche an Blut erhalten worden sind, interessieren hier wenig. Immerhin sei eine Versuchsserie angeführt, indem diese Flüssigkeit in ihrer Eigenschaft als Suspension auch für den Kolloidchemiker Anknüpfungspunkte bietet, wie wir dies letzthin in dieser Zeitschrift diskutierten.

Tabelle I.

Viskositätsmessungen an Blut unter Anwendung eines wechselnden Transpirationsdruckes.

Druckangabe in cm Hg. Temperatur 21°.

Transpirationsdruck	65,0	42,4	28,0	17,6	10,6	5,6
Viskosität	6,84	6,84	6,84	6,90	7,14	7,64

Ein Vergleich der Viskositätswerte, wie sie an ein und derselben Blutprobe bei Anwendung

¹⁰⁾ W. R. Hess, Arch. f. [Anat. u.] Physiologie 1912, 198.

¹¹⁾ E. Rothlin, Biochem. Zeitschr. 98, 34 (1919).

eines höheren oder niederen Druckes gemessen worden sind, zeigt erhebliche Differenzen. Die Werte von den Untersuchungen im starken Druckgefälle sind die kleineren. Es tritt dies mit unbedingter Konsequenz auf, so oft man auch untersucht. Wir finden dies durch Rothmann¹²⁾ und Rothlin¹³⁾ bestätigt.

Außerordentlich markant treffen wir die eben beschriebene Erscheinung nun auch bei Gelatinelösung. Ich zitiere eine Versuchsserie aus der unter ⁶⁾ erwähnten Arbeit.

Tabelle II.

Gelatinelösung 5 Stunden alt; Versuchstemperatur 21° C.

Druckdifferenz (cm Hg)	62,4	56,6	40,4	26,6	12,0
Viskosität	8,84	8,88	10,6	12,92	19,0

Je nach der Höhe des Transpirationsdruckes messen wir als „Viskosität“ einen höheren oder niederen Wert, während doch die Werte nach den Erfahrungen an anderen Flüssigkeiten übereinstimmen sollten; denn gemäß den Untersuchungsbedingungen und Kontrollversuchen mit Wasser oder Glycerin-Wassermischung befinden wir uns mit Sicherheit im Gebiete der gleitenden Strömung.

Mit dem Auftreten der eben beschriebenen Beobachtung bei Gelatinelösung hat es aber seine Besonderheiten. Es ist an bestimmte Bedingungen gebunden. Wenn wir nämlich als Untersuchungsobjekt eine frisch hergestellte Gelatinelösung, die eben von der Auflösungs-

¹²⁾ M. Rothmann, Ist das Poiseuille'sche Gesetz für Suspensionen gültig (Arch. f. ges. Physiologie 155, 318, 1914)

¹³⁾ E. Rothlin, loc. cit.

Tabelle III bis IIIc.

Viskositätsmessungen an Gelatinelösung verschiedenen Alters.

Tabelle III		Tabelle IIIa		Tabelle IIIb		Tabelle IIIc	
Viskositäts-widerstand	Druck in cm Hg	Viskositäts-widerstand	Druck in cm Hg	Viskositäts-widerstand	Druck in cm Hg	Viskositäts-widerstand	Druck in cm Hg
1,94	1,25	2,93	1,1	4,85	1,15	8,3	1,2
1,74	61,85	2,18	61,3	2,6	61,6	3,35	68,8
1,77	35,6	2,2	41,8	2,84	39,5	3,43	58,0
1,83	20,5	2,48	19,9	3,21	20,2	3,8	40,85
1,88	5,8	2,68	7,0	3,77	8,0	4,1	29,25
1,93	1,55	2,85	2,8	4,09	4,8	4,59	18,3
		2,98	1,15	4,58	2,2	5,18	10,35
				4,99	1,2	6,0	5,2
						7,2	2,35
						8,0	1,05
15 Minuten nach der Lösung	Versuchstemp. 15°	Dieselbe Gelatine 1 Std. später	Versuchstemp. 15,5°	Dieselbe Gelatine 3 Std. n. d. erst. Vers.-Serie	Versuchstemp. 15,5°	Dieselbe Gelatine 5 Std. n. d. ersten Versuchs-Serie	Versuchstemp. 15,5°

temperatur auf 20° abgekühlt worden ist, wählen, so liefern die Messungen bei hohem und niedrigem Druckgefälle übereinstimmende Werte. Wiederholen wir die Untersuchungen nach einigem Zuwarten, z. B. einer Stunde, so finden wir fürs erste die Viskosität erhöht gegenüber der ersten Messung. Diese Erscheinung ist durch die Untersuchung von P. v. Schröder, S. J. Levites, W. Biltz u. a. bekannt und diskutiert¹⁴⁾. Mit diesem Anwachsen der innern Reibung tritt nun auch die Diskrepanz der Werte, die unter verschiedenen Druckbedingungen gemessen worden sind, auf. Sie wird um so größer, je weiter wir uns zeitlich von der Herstellung der Lösung entfernen und je konzentrierter die Gelatinelösung ist. In übersichtlicher Weise wird dies durch Tabelle III illustriert, welche der Arbeit Rothlin's¹⁵⁾ entstammt.

In Fig. 3 sind die Zahlenserien graphisch dargestellt.

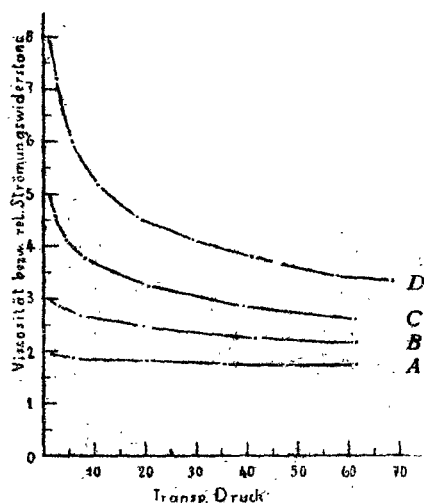


Fig. 3

Abhängigkeit der „Viskosität“ einer dreiprozentigen Gelatinelösung vom Transpirationsdruck gemessen bei verschiedenem Alter der Lösung.

Als Abszisse ist der Druck aufgetragen, unter welchem der Durchfluß stattgefunden hat. Die gemessenen „Viskositätswerte“ figurieren als Ordinate. Kurve A bezieht sich auf zweiprozentige Gelatinelösung bei 15,5° Versuchstemperatur, 15 Minuten nach Herstellung der Lösung untersucht, Kurven B, C und D

¹⁴⁾ Wo. Ostwald, Grundriß der Kolloidchemie (Dresden 1911).

¹⁵⁾ E. Rothlin, loc. cit. unter Fußnote 6. (Vgl. gen. Publ. S. 57 u. 58).

auf dieselbe Lösung 1, 3 und 5 Stunden später (als Versuchsserie A). Die zugehörigen Daten finden sich in der Originalmitteilung in Tabellen zusammengefaßt.

Bei zweiprozentiger Lösung endigt die zeitliche Fortsetzung der Serienuntersuchung unter den beobachteten Versuchsbedingungen mit der eintretenden Gelatinierung. Aber auch Gelatinelösungen, deren Konzentration so niedrig gewählt ist, daß es bei der angewendeten Versuchstemperatur in keiner Zeit zum Gelatinieren kommt, erweisen sich als vom Transpirationsdruck abhängig.

Wie bei Gelatine ergeben auch Untersuchungen an Stärke in diesem Punkte ein analoges Verhalten, indem nämlich die als Viskosität gemessenen Werte je nach den Druckbedingungen verschieden ausfallen. Rothlin hat diese meine Erfahrung durch seine Untersuchungen an Stärke ebenfalls bestätigt und ergänzt.

Eine seiner auf Stärkelösung sich beziehende Tabelle lautet:

Tabelle IV.

Fünfprozentige Stärkelösung.

Unlösliches Produkt. Versuchstemperatur 13°. 15 Minuten nach erfolgter Lösung untersucht.

Viskosität	4,95	5,19	5,4	5,7	6,12	6,41	6,63	4,99
Druck								
in cm Hg	68,5	58,8	36,80	19,65	7,7	4,1	1,7	68,1

In sehr viel geringerem Maße unterliegt dem Einfluß des Druckgefälles die lösliche Stärke (Kahlbaum), wie aus den Rothlin'schen Daten hervorgeht. Einer alkalischen Kaseinlösung fehlt nach meiner eigenen Erfahrung und nach derjenigen Rothlin's die Druckabhängigkeit im Bereiche der Messungsfehler der Apparatur vollständig, wenigstens bei Transpirationsdruckwerten zwischen 32,4 und 3,4 cm Hg an einer zweiprozentigen Lösung untersucht. Dasselbe fand Rothlin bei Gelatinelösung, die 10 Stunden lang im Rückflußkühler erhitzt worden war. Zur Illustrierung diene Tabelle V.

Tabelle V.

Zweiprozentige Gelatinelösung. 10 Stunden am Rückflußkühler erhitzt, Versuchstemperatur 19°.

Viskosität	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39
Druck								
in cm Hg	38,8	28,25	18,2	10,25	4,4	2,2	1,0	38,5

Weiter geht aus den Untersuchungen Rothlin's hervor, daß eine Lösung von Eierklar sich

in ziemlich hohem Maße druckabhängig erweist, so daß eine Probe im Druckgefälle von 26 cm Hg einen Wert von 2,76 angibt, bei 0,6 cm Hg dagegen von 4,9. Das Eiweiß war vorher zu Schaum geschlagen, hernach 10 Stunden stehen gelassen und dann durch Watte filtriert worden. Bei einer einprozentigen wässerigen Seiflösung ist die Diskrepanz noch ausgesprochenener mit 1,85 bei 70,30 cm Hg Transpirationsdruck gemessen und 7,00 bei 1,10 cm Hg. Lösungen von Dextrin und Gummiarabikum ändern ihre Werte ebenfalls mit dem Druck aber selbst in hoher Konzentration nur geringfügig.

Von Determann¹⁶⁾ war seiner Zeit, was Blut anbetrifft, die Diskrepanz als Folge von Versuchsfehlern angesehen worden. Die niedrigen Werte bei hohem Druckgefälle wurden als unrichtig gedeutet, indem mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit ein wachsender Betrag der Stromarbeit in Wirbelbildung verzehrt würde, nämlich in dem als Testflüssigkeit dienenden destillierten Wasser.

Dadurch würden die am Blut beobachteten Werte zu klein gemessen. Die Determann'sche Auffassung ist fraglos schon deshalb unrichtig, weil sonst bei allen Flüssigkeiten mit ähnlicher Viskosität die Diskrepanz in übereinstimmender Weise in Erscheinung treten müsste. Statt dessen treffen wir, wie eben gehört, bei verschiedenen der untersuchten Lösungen eine volle Übereinstimmung zwischen den bei hohem und bei niederem Drucke erhaltenen Daten. Ich erwähne hier noch speziell die Untersuchungen an Glycerin-Wassermischung, welche von mir zum Zweck der Kontrolle durchgeführt worden sind. Um jeden Zweifel zu beheben, daß die Ursache für die Diskrepanz nirgends anders als in dem Medium, das sie zeigt, gesucht werden kann, habe ich die Versuche derart modifiziert, daß als Kriterium der Druckabhängigkeit des innern Widerstandes nicht die Ablesung am Wassermeniskus, sondern das Produkt von Zeit mal Druck diene. Die Rolle des als Vergleichsflüssigkeit dienenden Wassers war damit eliminiert. Ich reproduziere die Daten einer Versuchsserie, die aus zwei früher publizierten tabellarischen Zusammenstellungen extrahiert sind¹⁷⁾.

Das Ergebnis ist die Feststellung, daß als Produkt von Transpirationsdruck und Durchflußzeit, welches im Bereich der gleitenden Strömung

Tabelle VI.

Gelatinelösung 2 Proz.

P=Druck in cm Hg

T=Durchflußzeit für das konstante Durchflußvolumen. V=10,0.

P×T=Produkt aus Druck mal Zeit auf die Einheit des Stromvolumens berechnet.

P	T	V	P×T
6,75	294,0	10,0	20
13,4	135,0	10,0	16
19,4	88,0	10,0	17
26,7	59,0	10,0	16
38,4	40,6	10,0	16
50,3	29,5	10,0	15
61,2	23,8	10,0	15
74,3	19,1	10,0	14
93,0	14,8	10,0	14
122,5	10,8	10,0	13
2,0	1230,0	10,0	25
-2,0	1255,0	10,0	25

(entsprechend dem Hagen-Poiseuille'schen Gesetz) konstant bleiben sollte, um so höhere Daten errechnet werden, je niedriger das Druckgefälle. Auch diese Versuchsanordnung ist von Röthlin mit vollständig übereinstimmendem Resultat wiederholt worden. Charakteristisch und sehr wesentlich ist dabei die Tatsache, daß die Druckabhängigkeit in hohen Drucklagen weniger prägnant ist und sich bei zunehmendem Drucke schließlich vollständig verliert. Es ist dies wichtig, einmal, weil damit einer Erklärung der Diskrepanz durch das Auftreten von Turbulenzerscheinungen der Boden entzogen ist, sodann deshalb, weil diejenigen Druckbedingungen gekennzeichnet werden, unter welchen man auch bei druckabhängigen Lösungen zu vergleichbaren Versuchsergebnissen gelangt.

Bevor wir nun versuchen, den eben referierten Beobachtungen unsere Deutung zu geben, sei darauf hingewiesen, daß von einigen andern Autoren Untersuchungsergebnisse bekannt gegeben worden sind, welche zu den unsrigen zweifellos Beziehung haben. Es gilt dies in gewisser Hinsicht für die Befunde von A. du Pré, Demning und Watson¹⁸⁾ nämlich insofern, als in ihren auf Blut sich beziehenden Daten die Ungültigkeit des Poiseuille'schen Gesetzes unter gewissen Bedingungen festgelegt ist. Die Bedingungen wurden aber von den genannten Autoren nicht richtig erkannt, indem

¹⁶⁾ H. Determann, Zeitschr. f. klin. Mediz. 73, Heft 3 u. 4; Deutsch. med. Wochenschr. 1911, Nr. 25.

¹⁷⁾ Zitiert unter Fußnote 4.

¹⁸⁾ A. du Pré, Demning u. Watson, The viscosity of the blood (Proceedings of the roy. soc. of London [B], 78, 1906).

sie für die Anwendbarkeit des Poiseuille'schen Gesetzes auf Blut die Lichtweite der Transpirationskapillare als maßgebend erachteten. Sie postulierten ein Mindestmaß von 3 mm Lichtweite. Es fällt nicht schwer, zu zeigen, daß in geeignetem Druckbereich noch mit 0,1 mm Lichtweite der Kapillaren für Blut Proportionalität zwischen Druck und Durchflußzeit erzielt werden kann.

1913 hat Hatschek¹⁹⁾ über Versuche berichtet, bei welchen er die Abhängigkeit der Viskosität einer einprozentigen Gelatinelösung und einer zweiprozentigen Stärkelösung von der Schergeschwindigkeit prüfte. Die Resultate stehen, wenigstens was die Gelatinelösung anbetrifft, in voller Uebereinstimmung mit unsern bereits 1910 bekannt gegebenen, hier zum Teil referierten Beobachtungen, die Hatschek offenbar unbekannt geblieben waren. Die Uebereinstimmung ist um so wertvoller, als Hatschek mit einer von der Transpirationmethode grundsätzlich verschiedenen Apparatur arbeitete, nämlich mit dem Viskosimeter von Couette in von Hatschek modifizierter Form. Neben der Feststellung der Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit schließt Hatschek aus theoretischen Gründen, daß oberhalb eines gewissen Gefälles die genannte Abhängigkeit nicht mehr bestehe, d. h. die Viskosität eine wirkliche Konstante werde, wie dies zwei seiner Kurven für Gelatinelösung mit niedriger Viskosität dartun.

Hatschek spricht ferner die Vermutung aus, daß für Transpirationsviskosimeter dieser Grenzwert weit überschritten sei. Indessen war, als er dies schrieb, die Brücke von seinen Beobachtungen zu den Resultaten der Transpirationmethode bereits geschlagen gewesen und darüber hinaus auch die Stabilisierung des Viskositätswertes bei Zunahme des Druckgefälles für hochvisköse Lösungen experimentell erwiesen.

Die Deutung der Resultate.

Den Schlüssel zur Erklärung der diskutierten Erscheinung gab mir die Beobachtung einer wohl nicht unbekannten Erscheinung, welche ich gelegentlich an einer verdünnten Stärkelösung machte. Wir lassen Stärkelösung z. B. von 1,5 Proz., welche in einer Schale in kreisende Bewegung versetzt worden ist, spontan zu Ruhe übergehen. Wenn der Ruhezustand unter steter Verringerung der Rotationsgeschwindigkeit eben erreicht zu sein scheint, sehen wir,

daß von neuem Bewegung in die Flüssigkeit kommt, nun in entgegengesetzter Richtung. Mit erst wachsender, dann wieder abnehmender Geschwindigkeit sucht die Lösung eine neue Ruhelage auf, in der sie aber auch nicht entgültig verharret. Erst nach mehrfachem Hin- und Herpendeln kommt es zum entgültigen Stillstand. Dieses Einpendeln fehlt bei einer Glycerin-Wassermischung von entsprechender Viskosität; der erste Stillstand ist hier gleich der definitive. Ich verweise auf eine Illustration dieses gegensätzlichen Verhaltens²⁰⁾. Die Glycerin-Wassermischung läßt, wie oben erwähnt, auch keine Abhängigkeit der Viskosität vom Druckgefälle erkennen. Hingegen verhält sich Blut, dessen Viskosität — wie wir gehört — im Bereiche kleiner Druckgefälle inkonstant ist, prinzipiell analog der Stärkelösung. Dieses Pendeln der Flüssigkeit um die entgültige Ruhelage kann nicht anders als durch elastische Kräfte bedingt, gedeutet werden, die im betreffenden Medium als Ausdruck vorhandener Strukturierung auftreten. Die Kräfte sind nicht so groß, daß sie der Schwerkraft entgegen, der Masse eine bestimmte Eigenform bzw. den Charakter einer Gallerte zu verleihen vermöchten. Beim bloßen Zusehen imponiert das Medium als Flüssigkeit. Gleichwohl tritt die Verschiebungselastizität bei jeder Deformation als Gegenkraft wirksam auf, sich dem eigentlichen Reibungswiderstand superponierend. Hat dieser selbst nur einen sehr kleinen Wert, wie beim Strömen im niedrigen Druckgefälle, so kommt der Effekt der Superposition im gemessenen „Viskositätswert“ prägnant zum Ausdruck. Mit steigendem Druckgefälle wächst auch der durch den Reibungsprozeß veranlaßte Widerstand und zwar proportional der Strömungsgeschwindigkeit. Diese Komponente des gesamten Strömungswiderstandes erhält dadurch immer mehr das Uebergewicht über die andere Komponente, deren Energiezehrung nicht entsprechend von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Die letztere tritt in ihrem Einfluß auf den Gesamtströmungswiderstand schließlich soweit zurück, daß der im Viskosimeter gemessene Wert im Bereich der Fehlerbreite mit der Reibungskomponente übereinstimmt. Gegenüber starken Kräften benimmt sich die Lösung dementsprechend nicht merklich verschieden von einer echten Flüssigkeit, während sie bei kleinen Deformationskräften ihre Gallerteigenschaften nicht voll-

²⁰⁾ W. R. Hess, Gehorcht das Blut dem allgemeinen Strömungsgesetz der Flüssigkeiten (Arch. f. d. ges. Physiologie 162, 210 u. 211, 1915).

¹⁹⁾ E. Hatschek, Koll.-Zeitschr. 73, 88 (1913).

kommen verbirgt! In dieser Deutung wird die hier diskutierte Erscheinung ein Beleg für die Richtigkeit der Auffassung, wie sie von Wo. Ostwald und J. v. Schröder²¹⁾ vertreten ist, daß nämlich die Zunahme der Viskosität verdünnter Gelatinelösungen mit der Zeit durchaus dem Gelatinierungsvorgang konzentrierter Sole entspricht. Dabei wird mit der Bezeichnung Viskosität allerdings ein etwas anderer Begriff verbunden, als sich aus dem hier referierten Resultaten rechtfertigen läßt. Gemeint ist hier der komplexe Deformationswiderstand. Auf diesen Punkt werden wir weiter unten noch eingehen. Im vollen Einklang steht unsere Deutung der Abhängigkeit des Strömungswiderstandes vom Transpirationsdruck ferner mit der Erklärung, welche Wo. Ostwald²²⁾ dem Effekt der mechanischen Vorbehandlung gewisser kolloider Lösungen gibt. Die Verringerung der Viskosität durch Hindurchpassieren durch die Transpirationskapillaren ist danach der Erfolg der Zerstörung einer vorhandenen Struktur.

Definition des Begriffes „innere Reibung“ bei gelatinierenden Lösungen.

In den früheren Arbeiten zum Thema Viskosität habe ich Gewicht darauf gelegt, einen Wert, der durch die Verschiebungselastizität über den Bereich der Messungsfehler hinaus einfließt, nicht als Maß für die innere Reibung gelten zu lassen. In der unter solcher Versuchsbedingung festgestellten Zahl haben wir ein relatives Maß für einen komplexen Strömungswiderstand, zu welchem der Reibungsprozeß eine Komponente liefert. Nun ist zuzugeben, daß diese Ausscheidung — als eine Frage der Nomenklatur behandelt — als unnötig angesehen werden kann.

So faßt tatsächlich Wo. Ostwald, laut der zwischen uns geführten Korrespondenz den Begriff weiter, indem er sich einer Definition anschließt, wie sie z. B. Guye²³⁾ für die Reibung fester Körper aufstellt. Dieser Forscher hält sich an eine Definition, welche unter innerer Reibung die Gesamtheit der Ursachen einbezieht, die als Effekt einen irreversiblen Energieverbrauch veranlassen, wenn die verschiedenen Teile, welche den Körper bilden, sich gegenseitig verschieben.

²¹⁾ Wo. Ostwald u. J. v. Schröder, Ueber die Bedeutung der Viskosität für das Studium des kolloiden Zustandes (Koll.-Zeitschr. 12, 213, 1913).

²²⁾ Wo. Ostwald, loc. cit.

²³⁾ M. Ch.-Eng. Guye, Frottement intérieur des solides (Journ. de Physique 1912 [III], 620).

Konsequenterweise bewertet Ostwald auch das Gelatinieren als ein Phänomen der inneren Reibung. Die Verwendung der Bezeichnung „Viskosität“ durch Hatschek deckt sich insofern mit derjenigen Ostwald's, als im Zusammenhang seiner Untersuchungen immer von Viskosität gesprochen wird, auch bei den Messungsergebnissen, bei welchen sich die Verschiebungselastizität im Messungsergebnis Ausdruck verschafft. Allerdings geschieht dies ohne die Erkenntnis, daß es sich um ein Symptom elastischer Deformationskräfte handelt. Wo hingegen die Ursache für Diskrepanzen in den Messungsergebnissen im Auftreten von Wirbeln beim Ueberschreiten der kritischen Geschwindigkeit (Reynolds) liegt, setzt Hatschek bezeichnenderweise den Ausdruck „Viskosität“ in Anführungszeichen, wohl zur Aeußerung seiner Auffassung, daß die so gemessenen Werte bei präziser Fassung des Begriffes eben nicht als Viskositätswerte zu gelten haben. Nach der selbst für feste Körper nicht allgemein angenommenen Definition von Guye würden sie dagegen darunter fallen.

Die Entscheidung der Frage, wie es nun weiterhin mit der Anwendung der Bezeichnung „innere Reibung“ = „Viskosität“ zu halten sei bei den Medien, deren Transpirationswiderstand sich auch in einem gewissen Bereiche der gleitenden Strömung mit dem Druckgefälle ändert, will ich gerne den Vertretern der physikalischen Chemie überlassen, die eher, als der Physiologe dazu berufen sind, hierüber zu urteilen. Immerhin möchte ich an dieser Stelle meine Argumente nennen, welche mir die engere Fassung des Begriffes „innere Reibung“ als die Richtige erscheinen lassen.

Maßgebend ist für mich der Gedanke an die theoretische Verarbeitung der Resultate der experimentellen Viskositätsforschung. Die hervorragende Bedeutung der letzteren für die Kolloidchemie, wie dies gerade Wo. Ostwald betont, ist heute außer Zweifel. Nun sind aber die Aussichten, physikalische oder chemische Eigenschaften, schließlich auch molekulartheoretische Vorstellungen mit einem experimentell festgestellten Faktor in gesetzmäßige Beziehung zu bringen umso schlechtere, je komplexerer Natur der letztere in seinem Wesen ist. Deshalb ist es unzumutbar, ursächlich verschieden bedingte Erscheinungen in einen Begriff zu fassen, auch wenn sie sich unter gewissen Bedingungen zu einer gemeinschaftlichen, gleichsinnigen Wirkung kombinieren, wie dies z. B. beim Strömen der

Gelatinelösungen der Fall ist. Für die Anwendung dieser Ansicht auf den eben genannten speziellen Fall ist es von entscheidender Bedeutung, daß unter andern Bedingungen die von der Kohäsion eines Strukturgebildes herrührenden Kräfte und die durch Reibung hervorgerufenen sich in ihrer Äußerung gerade entgegengesetzt verhalten. Dies ist der Fall in der beschriebenen Situation, wo nach Aufhören der Drehbewegung spontan eine gegenläufige Bewegung einsetzt. In diesem Moment erzeugen die elastischen Kräfte Bewegungen, während die Reibungsvorgänge natürlich auch in dieser Phase Bewegungsenergie verzehren. Wesentlich ist schließlich auch die Tatsache, daß im Bereich hoher Transpirationsdrucke die als „Viskosität“ gemessenen Werte ihre Abhängigkeit vom Druckgefälle verlieren, und sich auch die gelatinierenden Lösungen innerhalb der Beobachtungsfehler dem Verhalten echter Flüssigkeiten einordnen. Dieser konstante Wert ist es, welchem nach meinem Dafürhalten die Bezeichnung „innere Reibung“ reserviert bleiben soll. Ich bin überzeugt, daß wenn diese Differenzierung im heu-

tigen Sprachgebrauch nicht angenommen wird, die weitere Forschung später dennoch dazu führt.

Welchen Standpunkt ein Forscher schließlich zu dieser Definitionsfrage auch einnimmt, für das Experiment ist eine Konsequenz aus unsern Resultaten festgelegt: Die Kolloidviskosimetrie verlangt neben den üblichen Forderungen der Transpirationsmethoden noch die Erfüllung einer Druckbedingung. Sie ist bis heute von den mit Transpirationsviskosimetern arbeitenden Autoren nicht berücksichtigt worden, wodurch der Wert vieler Untersuchungen schwer beeinträchtigt, vielleicht zum Teil illusorisch gemacht worden ist. Hatschek hält überhaupt die mit dieser Methode festgestellten Daten nicht vergleichbar, sofern die Durchflußzeiten der verschiedenen Sole merklich auseinander liegen. Darin geht er aber zweifellos zu weit; tatsächlich sind die als Viskosität gemessenen Werte vergleichbar und auch im übrigen analog zu bewerten, wie die Viskositätswerte „echter“ Flüssigkeiten, wenn sie im Transpirationsdruckbereich erhoben werden, in welchem die Werte konstant d. h. druckunabhängig sind.

Die Viskosität von Blutkörperchen-Suspensionen.

Von Emil Hatschek (London).

(Eingegangen am 2. August 1920.)

In einer eben erschienenen Arbeit¹⁾ leitet W. R. Heß auf synthetischem Wege eine Formel für die Viskosität einer Suspension von starren Teilchen ab. Es wird zunächst eine optimale Anordnung der dispersen Phase angenommen, welche das Strömen der gesamten vorhandenen geschlossenen Phase gestattet; unter diesen idealen Bedingungen ergibt sich die einfache Beziehung:

$$\eta' = \frac{\eta}{1 - K}, \quad (1)$$

in welcher die Zeichen die folgende Bedeutung haben:

- η' Viskosität der Suspension
- η Viskosität des Dispersionsmittels
- K das in der Volumeinheit enthaltene Volum fester Masse.

Es ergibt sich nun aus weiteren Betrachtungen, daß, vom Idealfalle abgesehen, nur ein Teil der flüssigen Phase wirklich strömen kann; um diesem Umstande Rechnung zu tragen, ist statt des wirklichen Volums disperser Phase

ein „funktionelles Volumen“ aK in Rechnung zu setzen. Der Faktor a ist stets > 1 , variiert aber mit dem Gehalte an disperser Phase (antibat), wahrscheinlich mit der Teilchengröße (die sonst in der Formel nicht erscheint) und sicher mit dem Schergefälle. Der Einfluß des letzteren ist übrigens einwandfrei bewiesen durch Messungen mit dem verbesserten Couette'schen Apparate sowohl an Emulsoidsolen [E. Hatschek²⁾] als an groben Suspensionen [E. Humphrey und E. Hatschek³⁾]. Die auf wirkliche Suspensionen anzuwendende Formel lautet demnach:

$$\eta' = \frac{\eta}{1 - aK}. \quad (2)$$

Sie ist von Heß an Suspensionen von roten Blutkörperchen bis zu 78,8 Proz. Gehalt ($K = 0,788$) geprüft worden, wobei a zwischen den Grenzen 2,50 und 1,16 variiert.

Im Jahre 1911 leitete ich auf einem Wege, welcher dem von Heß eingeschlagenen im

²⁾ E. Hatschek, Koll.-Zeitschr. 13, 88 (1913).

³⁾ E. Humphrey und E. Hatschek, Proc. Phys. Soc. of London 28, Part V, 274 (1916).

¹⁾ W. R. Heß, Koll.-Zeitschr. 27, 1 (1920).