

Strömen von Gemischen mit Teilchen gleicher Grössen-Ordnung wie der Röhrendurchmesser

Autor(en): **Heinrich, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles =
Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg**

Band (Jahr): **37 (1942-1944)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-308181>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

**Strömen von Gemischen mit Teilchen gleicher
Grössen-Ordnung
wie der Röhrendurchmesser**

von P. HEINRICH.

Theoretischer Teil.

Die Viskosität des Blutes war der Gegenstand der Untersuchung zahlreicher Forscher. Hauptsächlich Ärzte und Biologen befassten sich mit diesem Problem, weil sie neben dem erkenntnistheoretischen Grund durch dessen Lösung ein diagnostisches und eventuell therapeutisches Hilfsmittel in die Hand zu bekommen hofften. Leider hat sich diese Hoffnung bis jetzt nicht voll verwirklicht. Dies ist verständlich, denn die Schwierigkeiten, die sich der viskosimetrischen Untersuchung des Blutes entgegenstellen, sind mannigfache. Blut stellt eine heterogene Flüssigkeit dar und zwar einen Grenzfall einer Emulsion und einer Suspension einer hochviskosen, inhomogenen Flüssigkeit bzw. eines elastischen, stark deformierbaren Festkörpers in einer inhomogenen Flüssigkeit als Emulsions- resp. Suspensionsmittel. Solange die Struktur des Erythrozyten nicht völlig bekannt ist, darf man ihn als Flüssigkeitstropfen betrachten, indem das Stroma stäbchenförmig suspendiert ist. Man kann ihn aber auch als Festkörper auffassen, in dessen Stromagerüst Eiweisskörper und Chromoproteide eingelagert sind, und der von einer mosaikartigen Hülle von Lipoiden und Proteiden umgeben ist. Sowohl das Volumen des roten Blutkörperchens wie auch die chemische Natur seiner Bausteine werden beeinflusst durch den osmotischen Druck, die Sauerstoffspannung und die Wasserstoffionenkonzentration. Das Plasma, in dem die

Erythrozyten mit andern Formbestandteilen emulgiert oder suspendiert sind, stellt bekanntlich ein äusserst kompliziertes Gemenge von Elektrolyten, Eiweisskörpern, Fettstoffen, Aminosäuren, Fettsäuren, Harnstoffderivaten, Zuckern, Phosphorsäureestern, usw. dar. Immerhin ist seine Zusammensetzung einigermaßen konstant und sein Viskositätskoeffizient ohne besondere Vorsichtsmassregeln in einem Kapillarviskosimeter bestimmbar. Es muss jedoch zur Reproduzierbarkeit solcher Bestimmungen stets angegeben werden, bei welcher Durchflussgeschwindigkeit die Messung vorgenommen wurde, da der Viskositätskoeffizient des Serums¹ und der Eiweisslösungen überhaupt geschwindigkeitsabhängig ist. Auch bei andern Solen sowie bei Suspensionen von Festkörpern in indifferenten Flüssigkeiten wurde diese Geschwindigkeitsabhängigkeit des Viskositätskoeffizienten beobachtet^{2 3 4 5}.

Die Bestimmung des Viskositätskoeffizienten des Gesamtblutes wie auch einer Erythrozytensuspension in Ringerlösung erfordert besondere Vorsichtsmassregeln und verlangt zu ihrer Reproduzierbarkeit die Angabe des Hämatokritwertes, der Sauerstoffsättigung, der Durchflussgeschwindigkeit und des Durchmessers, sowie der Form der verwendeten Kapillare. Was die Abhängigkeit des Zähigkeitsmasses vom Rohrdurchmesser anlangt, so herrschte hierüber längere Zeit Uneinigkeit unter den verschiedenen Bearbeitern dieser Frage. Einige Autoren behaupteten, dass diese Abhängigkeit dem Poiseuille'schen Gesetz entsprechend sei, also eine quadratische Funktion darstelle⁶, andere hingegen glaubten bei Benützung der Poiseuille'schen Formel mit der Abnahme des Kapillardurchmessers einen Viskositätsanstieg zu beobach-

¹ W.-R. HESS, Kolloid-Z. **27**, 154 (1920).

² E. HATSCHKE, Kolloid-Z. **13**, 88 (1913).

³ E. HUMPHREY und E. HATSCHKE, Proc. Phys. Soc. Lond., **28**, 274 (1910).

⁴ E. HATSCHKE und R. S. JANE, Kolloid-Z. **40**, 53 (1926).

⁵ R. KÖHLER, Kolloid-Z. **43**, 187 (1927). Weitere Literaturangaben über diesen Punkt finden sich bei E. HATSCHKE, Die Viskosität der Flüssigkeiten. Verlag Th. Steinkopf, Leipzig (1929) und bei W. PHILIPPOFF, Viskosität der Kolloide, gl. Verlag (1942).

⁶ LEWY, Pflügers Arch. **65**, 447 (1928) vergl. HESS, Arch. Physiologie 1912, 197 und TREVAN, Biochem. J. **12**, 69 (1918).

ten¹ wieder andere behaupteten das Gegenteil². A. MÜLLER hat hier endgültige Klarheit geschaffen und nachgewiesen, dass mit der Abnahme des Röhrendurchmessers auch eine Abnahme des Viskositätskoeffizienten erfolgt, falls die Poiseuille'sche Formel zu seiner Berechnung benützt wurde³. H. SUTER konnte diese Befunde bei Untersuchungen über die Viskosität von Frosch-, Schwein- und Rinderblut bestätigen⁴.

Auch dieses Verhalten scheint nicht unbedingt spezifisch für Blut. EIRICH und GOLDSCHMID⁵ hatten bei Glaskugelsuspensionen in einem Gemisch von Merkurinitrat und Salpetersäure, dessen Dichte annähernd die gleiche wie die der Glaskugeln war, gefunden, dass bei kleinerem Rohrdurchmesser eine niederere relative Viskosität zu beobachten war. A. MÜLLER⁶ zeigte, dass für Kohlesuspensionen (Dichte: im Mittel 1,45) in Glycerin (Dichte: 1,132) das Zähigkeitsmass bei zunehmendem Kapillarenradius ebenfalls zunimmt.

Bei diesen Versuchen war der Teilchenradius indessen immer noch erheblich kleiner als der Röhrendurchmesser. Bei Modellversuchen mit Gummiplättchensuspensionen in Glycerin fand indessen A. MÜLLER⁷ ein umgekehrtes Verhalten. Freilich handelte es sich hierbei um ausserordentlich kleine Konzentrationen, weshalb man aus diesen Versuchen keine zu weitgehenden Schlüsse ziehen darf.

Das Verhältnis Teilchendurchmesser zum Rohrdurchmesser war wie 3:4 bzw. wie 1:8. Versuche, Blutkörperchen durch Kapillaren von einem kleineren Durchmesser als 50μ strömen zu lassen, stossen auf grosse technische Schwierigkeiten.

¹ DU PRÉ DENNING und WATSON, Proc. Roy. Soc. B. **78**, 347 (1906); vergl. DETERMANN, Dtsch. Kongress. Inn. Med. 1910.

² FAHRAEUS und LINDQVIST, Am. J. Physiolog. **96**, 652 (1912); vergl. RATHMANN, Pflügers Arch. **155**, 251 (1914); A. ROTHLIN, Pflügers Arch. **179**, 195 (1920); P. MARTINI, A. PIERRACH und E. SCHREYER, D. Arch. klin. Med. **68**, 211 (1930).

³ A. MÜLLER, Abhandlungen zu Mechanik der Flüssigkeiten, Verlag Universitätsbuchhandlung Fryburg (1936).

⁴ H. SUTER, Archiv f. Kreislaufforschg. **10**, 339 (1942).

⁵ F. EIRICH und C. GOLDSCHMID, Kolloid-Z. **81**, 7 (1937).

⁶ A. MÜLLER, Archiv f. Kreislaufforschg. **9**, 325 (1941).

⁷ A. MÜLLER, loco. cit. 9.

Für die Hämodynamik wäre es aber gerade ausserordentlich wichtig, die Energieverluste infolge Reibung in den feinsten Gefässchen unseres Körpers, zum Beispiel in den Lungenkapillaren, kennen zu lernen. Dort ist der Kapillardurchmesser gleich oder nahezu gleich dem Erythrozytendurchmesser. Die genaue Kenntnis des Reibungsmasses des Blutes in diesen Kapillaren wäre auch für die Pathologie von grösster Bedeutung.

Nach unserer Kenntnis der Literatur war es erstmals A. MÜLLER¹, der vor kurzem den Versuch unternahm, die Strömung von Teilchen mit einem Durchmesser gleicher Grössenordnung wie der Rohrdurchmesser zu untersuchen. Es kamen Kugeln aus Buchsbaumholz von einem mittleren Durchmesser von 0,75 cm und einer mittleren Dichte von 1,26 zur Verwendung, suspendiert in Glycerin von einer Dichte von 1,1626. Diese Kugeln strömten durch Röhren von 0,80, 0,96 und 1,20 cm Durchmesser. Es wurde auch hier die Gesetzmässigkeit der Abnahme des Viskositätskoeffizienten bei höherer Geschwindigkeit bestätigt. Jedoch ermöglichte die Versuchsanordnung nicht, einen gleichmässigen Abstand der Körperchen voneinander zu garantieren und auch die Konzentrationen konnten nicht beliebig variiert werden. Ausserdem handelte es sich um starre Körperchen mit mehr oder weniger rauher Oberfläche, wodurch Verkeilungen und Verklemmungen jedenfalls wahrscheinlicher sind als bei elastischen Körpern mit glatter Oberfläche. Vergleichsversuche, in denen mehrere Körperchen gleichzeitig den Querschnitt passieren, wurden noch nicht ausgeführt.

Es lag daher im Rahmen der bisherigen Arbeiten unseres Institutes, wenn wir diese Arbeiten A. MÜLLERS mit seiner Einwilligung weiterzuführen trachteten. Wir entschlossen uns mit Makrosuspensionen zu arbeiten, zunächst Emulsionen kugelförmiger Körper, deren Grösse, Konzentration und Geschwindigkeit genau regulierbar ist, und die einen regelmässigen Abstand voneinander besitzen. Letzteres, um Einflüsse durch Berührung, Verklemmung, gegensinnige Rotation usw. weitgehend auszuschalten.

Es war nicht ganz leicht, eine Versuchsanordnung zu finden, die diese Bedingungen zu erfüllen gestattete. Auch sind wir noch weit davon entfernt, jede beliebige gewünschte Konzentration

¹ A. MÜLLER, Archiv für Kreislaufforschung **14**, 80 (1944).

bei konstanter und variierbarer Geschwindigkeit und bei gleichbleibenden Körperchendurchmesser unsere Röhre passieren zu lassen, wie dies anzustreben wäre. Zum Verständnis unserer Versuche sei der von A. MÜLLER erdachte und uns vorgeschlagene Apparat zunächst nur kurz skizziert; eine eingehendere Beschreibung sei dem praktischen Teil vorbehalten.

Die unter variierbarem Überdruck stehende Flüssigkeit, deren Makroemulsion gewünscht wird, tritt durch eine feine Düse von unten her in einen mit Wasser gefüllten Behälter. Die Düse wird durch ein mit regulierbarer Geschwindigkeit sich drehendes elliptisches Rad auf und ab bewegt. Die Bewegung der elliptischen Scheibe bewirkt zunächst die Loslösung des Tropfens der hydrophoben Flüssigkeit, z. B. Paraffinöl. Losgelöst nimmt der Tropfen auf Grund seiner Kohäsion Kugelgestalt an und steigt, wegen seiner geringeren Dichte, nach oben, wobei er jedoch von der nach unten gerichteten trichterförmigen Öffnung einer Röhre abgefangen wird. Einmal im Innern des Trichters ist er in seiner Bewegung nicht mehr frei, sondern wird von dem durch das Rohr fliessenden Wasser, seinem Suspensionsmittel, fortgetragen. Er und seine Vorgänger und Nachfolger rollen jetzt gewissermassen in Reih und Glied durch die Röhre. Vorausgesetzt, dass man die Geschwindigkeit konstant halten will, kann die Konzentration geändert werden durch Einsetzen einer anderen Düse, Änderung des auf der hydrophoben Flüssigkeit lastenden Druckes und gleichzeitige Änderung der Frequenz des Motors.

Dies ist jedoch ein sehr unbequemes und zeitraubendes Verfahren. Vor allem ist das Risiko gross, dass der Trichter des Rohres mit der hydrophoben Flüssigkeit benetzt wird, was natürlich den sofortigen Abbruch des Versuches zur Folge hat. Aber auch wenn man darauf verzichtet, die Düse zu vertauschen und nur versucht, durch die Änderung der Motorfrequenz und Druckvariation eine grössere Zahl von Kugeln in der Zeiteinheit die Röhre passieren zu lassen, gelingt es einem kaum, die gleiche Kugelgrösse zu reproduzieren. Ausserdem wird bei vermehrten Kugelzustrom immer eine gewisse Zeit benötigt, bis es gelungen ist, den gleichmässigen Abstand der Kugeln wieder zu realisieren.

Wir gehen daher so vor, dass wir bei einer bestimmten Umdrehungszahl des Motors, bei konstantem, auf der hydrophoben

Flüssigkeit lastenden Druck und unter Beibehaltung der gleichen, geeigneten Düse nur die Druckhöhe im Wasserbehälter ändern, und so die Konzentration der Kugeln vermindern oder erhöhen. Auf diese Weise haben wir natürlich für jede Druckhöhe eine bestimmte Kugelkonzentration bzw. jeder Konzentration von Kugeln entspricht eine gewisse Geschwindigkeit. Wir messen nun das während einer bestimmten Zeit das bei einem bestimmten im Wasserbehälter herrschenden Druck ausfliessende Volumen der Makroemulsion und können so den Viskositätskoeffizienten rechnerisch bestimmen. Die Bestimmung des im Wasser emulgierten Anteils gibt uns die Konzentration. Tragen wir jetzt graphisch das Zähigkeitsmass der Reibung als Funktion der Konzentration auf, so erhalten wir eine Kurve, die wir im Folgenden als « *Grundkurve* » bezeichnen.

Diese Grundkurve ist abhängig von der Kugelgrösse und von der Zahl der in der Zeiteinheit die Röhre passierenden Kugeln (siehe die Grundkurven der Abb. 7). Sie scheint *unabhängig von der chemischen Natur des emulgierten Körpers* zu sein, vorausgesetzt natürlich, dass es sich um hydrophobe Flüssigkeiten handelt. Wir verwendeten Paraffinöl und o-Xylol; das heisst also Körper, deren chemische Struktur und deren physikalische Eigenschaften voneinander weitgehend abweichen (siehe Grundkurven Abb. 5).

Was den Temperaturkoeffizienten betrifft, so können wir mit ziemlicher Sicherheit behaupten, dass er die Form der Kurven nicht beeinflusst, sondern nur ihre relative Lage im Koordinatensystem. Da diese Lageänderung anscheinend nur um jenen Betrag erfolgt, der der Änderung des Viskositätskoeffizienten des Wassers entspricht, kann ausgesagt werden, *dass sich der Einfluss der Temperatur bei unseren Makroemulsionen nur in Bezug auf das Emulsionsmittel geltend macht.*

Freilich sind die erhaltenen Kurven nicht gerade ideal zu nennen; jedoch muss hiezu angeführt werden, dass die Grösse der Kugeln nicht für alle Versuche genau gleich gewählt werden konnte. Diese beeinflusst aber auch die Form der « Grundkurven ». In welchem Mass dieser Einfluss sich geltend macht, können wir aus den bisherigen Versuchen noch nicht quantitativ angeben. Die Konstanterhaltung der Kugelgrösse wäre aber für genauere Messungen unerlässlich.

Eine dritte Aussage, die wir schon jetzt bei dem gegenwärtigen Grad der Präzision unserer Messungen machen können, betrifft die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Viskositätskoeffizienten. Zur Prüfung dieser Abhängigkeit wäre es gegeben gewesen, bei gleicher Konzentration verschiedene Geschwindigkeiten durch Druckhöhenvariation einzustellen. Da wir aber, wie bereits erwähnt, bei unserer Anordnung hiezu nicht imstande waren, so haben wir für jede der erwähnten « Grundkurven » eine weitere Kurve aufgestellt, die die Geschwindigkeit als Funktion der Konzentration gibt. Aus diesen Geschwindigkeitskonzentrationskurven lässt sich dann die Geschwindigkeit für eine bestimmte Konzentration ablesen. Da bei unsern Versuchen Konzentrationen über 25 Volumprozent nur schwer zu erzielen sind, haben wir zum Vergleich nur Konzentrationen von 5, 10, 15 und 20 Volumprozent gewählt und hiefür den Viskositätskoeffizienten bei fünf verschiedenen Geschwindigkeiten aufgetragen (siehe Abb. 7 und 8). Aus diesen Versuchen geht klar hervor, dass *auch bei den hier untersuchten Makroemulsionen der Viskositätskoeffizient geschwindigkeitsabhängig ist*. Das Mass der Zähigkeit nimmt ab bei steigender Geschwindigkeit.

Weitere Untersuchungen über diese besondere Art der Strömung sind im Gange. Insbesondere stellt sich als interessantes Problem die Prüfung der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Viskositätskoeffizienten bei Makroemulsionen, bei denen die Dichte des Emulsionsmittels und die der emulgierten Flüssigkeit einander gleich sind, also der Faktor der Wandreibung wegfallen würde. Vielleicht besteht hier eine Möglichkeit, den Faktor der Wandreibung quantitativ zu erfassen.

Da wir bei unseren Versuchen nur Konzentrationen von maximal 25% untersuchen konnten, im Blut sich aber ungefähr 40% Erythrocyten suspendiert oder emulgiert befinden, so sollen auch Anordnungen getroffen werden, die dieser Konzentration näherzukommen gestatten.

Praktischer Teil¹.

Unser Ziel war, wie im theoretischen Teil erläutert, die Messung des Viskositätskoeffizienten μ' einer Makroemulsion mit Teilchen gleicher Grössenordnung wie der Kapillardurchmesser, und die Prüfung der Abhängigkeit dieses Viskositätskoeffizienten von der Teilchengrösse, der Geschwindigkeit, der Konzentration und von der Natur des Emulsionsmittels und der emulgierten Flüssigkeit. Unsere Messungen wurden in der klassischen Anordnung nach POISEUILLE durchgeführt, wobei jedoch einige Vereinfachungen sich als notwendig erwiesen. Derartige Messungen erfordern zu ihrer Reproduzierbarkeit die folgenden Angaben:

1. Masse und Anordnung der Röhren;
2. Chemische und physikalische Eigenschaften der verwendeten Flüssigkeiten;
3. Regulierung und Messung der Druckhöhe;
4. Herstellung der Makroemulsion;
5. Temperaturkoeffizient;
6. Bestimmung der Ausflussmenge, sowie der Konzentration des emulgierten Körpers in Volumprozent;
7. Bestimmung der Teilchengrösse;
8. Versuchstabellen.

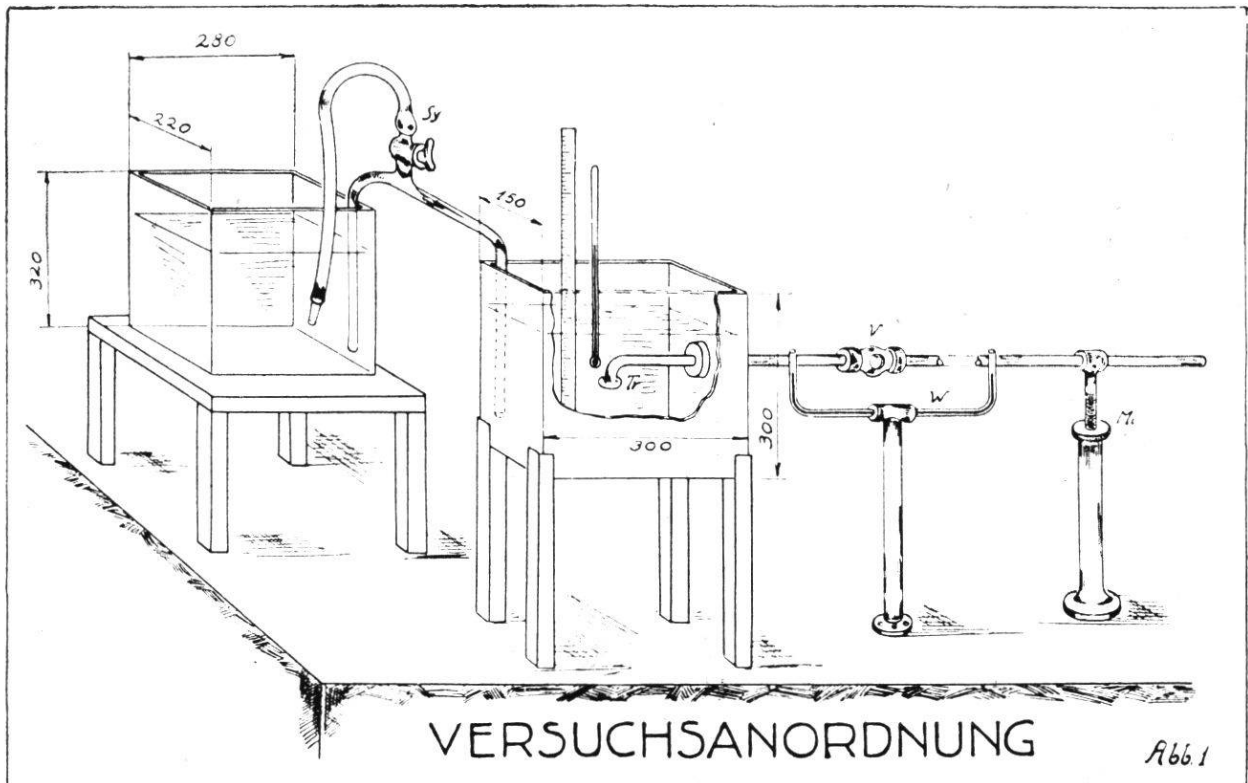
Diese Reihenfolge der Besprechung scheint uns geeignet, alle wichtigeren Einzelheiten und Fehlerquellen unserer Methode aufzuzeigen, ohne zu häufige Wiederholungen und Rückverweise. Ausserdem gestattet sie dem auf dem Gebiet der Viskositätsmessungen experimentell Bewanderten, das ihm unwesentlich Scheinende zu überfliegen und nur die für ihn interessanten Einzelheiten zu interceptieren. Er wird daher, die folgende etwas schematische Behandlung wohl entschuldigen.

1. Masse und Anordnung der Röhren.

Unsere hauptsächlich verwendete Röhre besass eine Länge von 142,4 cm und einen Radius von 0,1408 cm. Daneben wurde eine kürzere von einer Länge von 72,1 cm und einem Radius von

¹ Meinem Kollegen G. DESSONAZ sei für seine freundliche Mithilfe auch an dieser Stelle bestens gedankt.

0,1421 cm verwendet. Diese beiden Röhren hatten die in der Abbildung 1 gezeigte Form, das heisst, sie waren an ihrem einen Ende umgebogen und zu einem kleinen Trichter erweitert. Es sei bemerkt, dass die Längenabmessungen der beiden Röhren von ihrem einen Ende bis eben zum Beginn der trichterförmigen Verjüngung gelten. Eine dritte Röhre war ungebogen und ohne trichterförmige Öffnung; sie hatte einen Radius von 0,1425 cm und eine Länge



von 105,25 cm. Jede der beiden ersteren konnte mit der letzterwähnten dritten Röhre Glas an Glas und Lumen auf Lumen dicht anschliessend verbunden werden. Die Verbindung geschah zunächst durch Umwickeln mit einem Kunstharzstreifen «Luzida» und sodann durch Verschraubung mit einem in der Industrie oft gebrauchten Verbindungsstück, wie es in der Abbildung 1 (V) vergrössert gezeigt ist.

Die Röhren mit trichterförmigem Ansatzstück waren mittels eines Gummistopfens seitlich so befestigt, dass die Trichteröffnung nach unten gerichtet war. Mittels einer grossen Wasserwage (W in Abb. 1) wird die Lage der Röhre ausserhalb des Behälters korrigiert. Eine Mikrometerschraube, die dem Rohr bzw. dem Röhrensystem gleichzeitig als Stütze dient, gestattet geringfügige Höhenänderungen zu bewerkstelligen (Mi in Abb. 1).

Bei dieser Anordnung befinden sich etwa 10 cm der Röhre innerhalb des Behälters, der übrige Teil ist ausserhalb. Dieser Umstand stellt insofern eine Fehlerquelle dar, als es uns nicht möglich war, Innen- und Aussentemperatur des Behälters genau gleich zu halten. Temperaturdifferenzen von $\pm 1^\circ$ konnten leicht auftreten.

Da die Form der Röhrenmündung den Wert des Viskositätskoeffizienten beeinflusst¹, schien es uns angezeigt, sie mit destilliertem Wasser zu eichen. Die Abweichungen betragen etwa 2-4% von dem theoretischen Wert des Viskositätskoeffizienten nach Kohlrausch. Diese Abweichung wäre bei Arbeiten mit homogenen Flüssigkeiten unzulässig und müsste experimentell eliminiert werden. Da aber bei unseren Versuchen meist Unterschiede von mindestens 10 durchschnittlich aber solche von 20 bis 200% des Wasserwertes gemessen werden, glaubten wir diese Unstimmigkeit auf sich beruhen lassen zu können.

2. Chemische und physikalische Eigenschaften der verwendeten Flüssigkeiten.

Wie bereits erwähnt, bestanden unsere Makroemulsionen aus destilliertem Wasser, welches beim Durchfliessen der Röhren Kugeln einer hydrophoben Flüssigkeit mit sich trug. Die von uns hauptsächlich verwendete Flüssigkeit war Paraffinöl (Provenienz SIEGFRIED, Zofingen). Dieses Paraffinöl hatte eine Dichte $D_{20^\circ} = 0,875$, einen mittleren Siedepunkt von ca. 335° und einen Viskositätskoeffizienten $\mu_{20^\circ} = 68,54$ cp. Der angegebene Viskositätskoeffizient stellt einen Mittelwert aus drei Messungen in der Anordnung nach Poiseuille dar.

Vergleichsversuche wurden sodann mit O-Xylol (purissimum, Provenienz SCHERING, Berlin) unternommen. Die physikalischen Konstanten dieses Körpers sind bekannt:

$D_{20^\circ} = 0,8812$, Siedepunkt $144,6^\circ$,² Viskositätskoeffizient

$\mu_{20^\circ} = 0,807$ cp.³

¹ A. MÜLLER, Archiv f. Kreislaufforschung 8, 249 (1941).

² BEILSTEINS, Handb. d. org. Verb. Bd. V. 1. Ergbd. S. 179.

³ E. HATSCHKE, Die Viskosität der Flüssigkeiten, Verlag Th. Steinkopf (1929) S. 65.

3. Regulierung und Messung der Druckhöhe.

Als Wasserbehälter verwendeten wir einen schmiedeeisernen Trog von 30 cm Länge, 14 cm Breite und 30 cm Höhe (Innenmasse). Da weder Email noch Zink, noch Silberschichten in den Ecken und Fugen eines solchen Gefässes gleichmässig bedeckend angebracht werden können, und Farblacke wegen der zuweilen nötigen Reinigung des Gefässes mit organischen Lösungsmitteln ausschieden, entschlossen wir uns zu einer Feuerverzinnung des Troges. Zinn hat den Vorteil, dass es gegenüber destilliertem Wasser wie auch gegenüber Kohlensäure weitgehend beständig ist und auch von den emulgierten organischen Flüssigkeiten in keiner Weise angegriffen wird. In der Mitte der Breitseite des Troges ist ein grosses gläsernes Fenster wasserdicht eingelassen, das bequem eine Beobachtung des Inneren gestattet.

Der verzinnte Eisentrog ist durch ein Syphon (*Sy* in Abb. 1) mit einem gläsernen Reservebehälter in Verbindung. Ein am Boden des Eisentroges angebrachtes Abflussrohr mit Hahn gestattet den Trog rasch zu leeren. Der dreischenkelige Syphon, an dessen oberem Schenkel sich ebenfalls ein Hahn befindet, kann während des Versuches leicht ein- und ausgeschaltet werden. Diese Anordnung erlaubt ein rasches Heben und Senken des Wasserspiegels ohne Wirbelbildung, welche im Interesse des gleichmässigen Kugelabgangs unbedingt vermieden werden muss. Lässt man den Heber während des Versuches eingeschaltet, bietet dies den Vorteil, dass die Druckhöhe, auch bei rascherem Ausfluss durch die Röhre, nur langsam sinkt.

Die Beobachtung der Druckhöhe erfolgte zumeist von unten her durch das gläserne Fenster. An der dem Fenster gegenüberliegenden Seite ist zu diesem Zweck ein metallener Masstab angebracht. Diese Art der Beobachtung hat den Vorteil, dass Fehler infolge Adhäsion des Wassers am Rande des Masstabes vermieden werden.

Es muss bemerkt werden, dass bei grösseren Geschwindigkeiten von der Druckhöhe ein bestimmter Betrag abgezogen werden muss, der dazu diente, der Flüssigkeit eine kinetische Energie beim Ausfluss zu erteilen; es ist also bei grossen Geschwindigkeiten ein Korrekturfaktor zu errechnen. Wir werden darauf im 8. Abschnitt zurückkommen.

4. Herstellung der Makroemulsion.

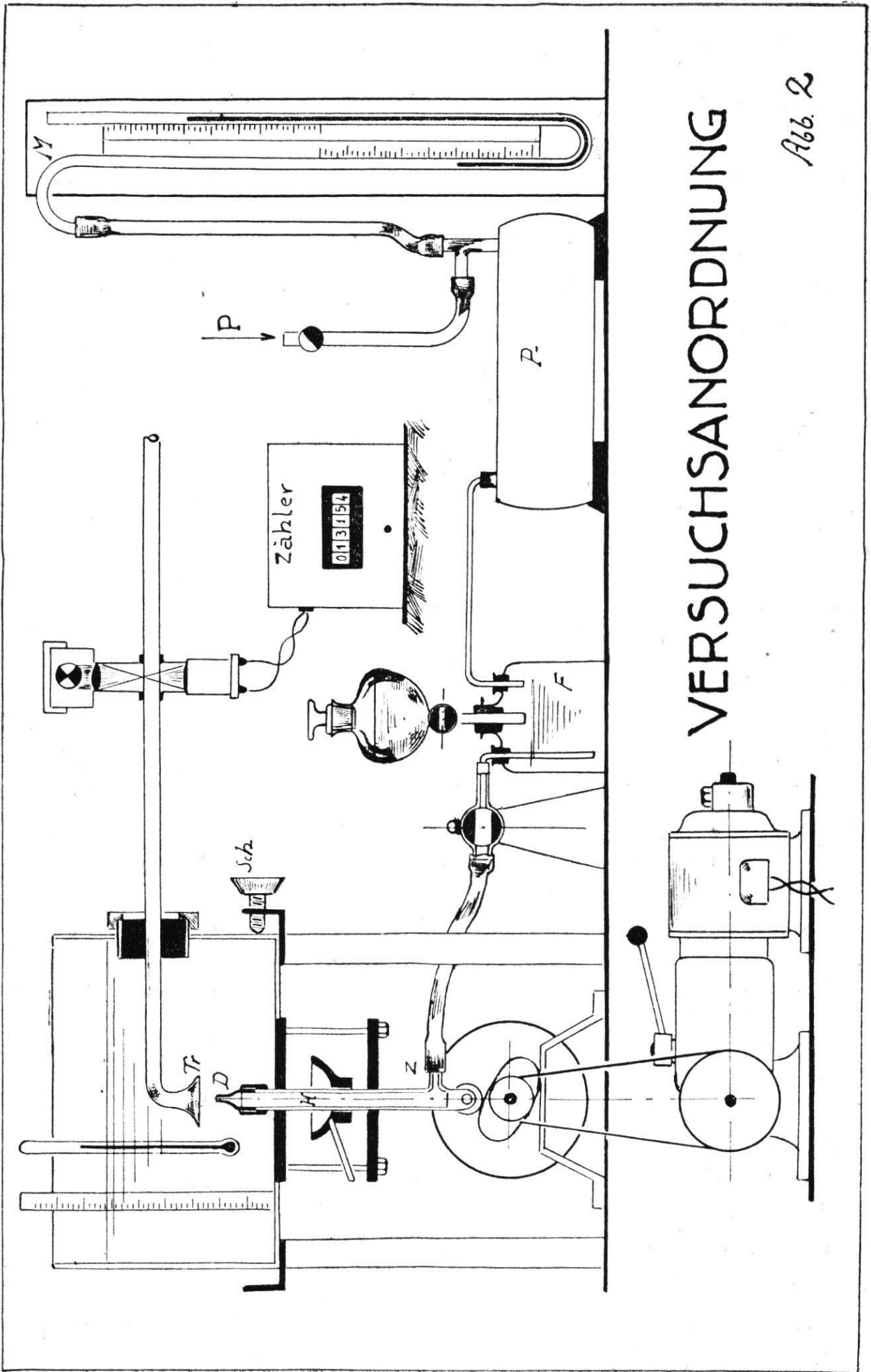
Die das Rohr fast ausfüllenden Kugeln hydrophober Flüssigkeiten werden aus einer rhythmisch stossartig auf und ab bewegten, feinen Glasdüse *D* unterhalb des kleinen Trichters (*Tr* in der Abbildung 1 und 2) ausgestossen. Infolge ihres geringeren spezifischen Gewichtes steigen die Kugeln dann nach oben, werden von der Trichteröffnung aufgenommen und vom Strom des abfliessenden Wassers mitgeführt.

Aus der Abb. 2 ist die Art der Befestigung und der Bewegung der Glasdüse ersichtlich. Am Boden des Wasserreservoirs befindet sich eine Öffnung, in der ein Hohlstempel *H* auf- und abgeschoben werden kann. Der Stempel muss möglichst genau und wasserdicht angepasst, andernteils aber doch leicht verschiebbar sein. Am Fuss des Hohlstempels, der unten verschlossen ist, befindet sich ein 4 mm breites Rad von 5 mm Radius, das auf einer elliptischen Messingscheibe (*El* in Abb. 2) leicht drehbar aufliegt. Eine Stahlfeder presst den Stempel nach unten; die elliptische Scheibe, die mit einem gusseisernen Schwungrad auf gleicher Achse montiert ist, schiebt ihn bei jeder Umdrehung nach oben.

An dem innerhalb des Behälters befindlichen Ende des Hohlstempels, ca. 2 cm unterhalb der Trichteröffnung, ist die erwähnte, leicht abmontierbare Glasdüse befestigt. Aus ihr wird zwecks Bildung der Kugelsuspension die hydrophobe Flüssigkeit unter einem bestimmten Druck ausgepresst.

Seitlich in den Hohlstempel eingelassen ist ein Zuleitungsrohr *Z*, durch welches die auszuspritzende Flüssigkeit in den Hohlstempel und von dort in die Glasdüse gelangt. Am Zuleitungsrohr befestigt ist entweder ein Schlauch aus Gummi oder aus Chlorvinylnkautschuk der am andern Ende mit einem gebogenen Glasrohr dicht schliessend verbunden ist. Das Glasrohr ist mittels Gummistopfen in einer Wulffschen Flasche (*F* in Abb. 2) so befestigt, dass es fast den Boden berührt.

Die Wulff'sche Flasche dient als Reservoir für die einzuspritzende Flüssigkeit. Die eine ihrer Öffnungen dient zum Nachfüllen, die zweite für die eben erwähnte Ölleitung und die dritte der Zuleitung des Druckes. Letztere erfolgt durch einen dickwandigen Schlauch, der mit zwei grossen, 60 Liter fassenden Druck-



VERSUCHSANORDNUNG

Abb. 2

flaschen P die Verbindung herstellt. Der Druck, der in den Druckflaschen herrscht, kann durch ein Manometer M kontrolliert werden. Die Dichtigkeit dieses Druckübertragungssystems muss eine vollständige sein, da ein Abfall des Druckes um ein bis zwei mm Quecksilber bereits beträchtliche Unterschiede in der Kugelgrösse verursacht.

Was die Form der Glasdüsen anlangt, durch die die Ausstossung der Kugeln erfolgt, so muss sie der jeweils gewählten Umdrehungszahl des Motors angepasst sein. Wir verwendeten vier Düsen deren Durchmesser 116, 149, 413 und 429 μ betragen. Indessen spielt nicht nur die Grösse der Düsenöffnung, sondern auch die Form der Düsen eine wichtige Rolle für die Grösse der entstehenden Kugeln. Für Flüssigkeiten mit kleinem Viskositätskoeffizienten ist es von Vorteil, Kapillaren von etwa 200 μ Durchmesser zu wählen und sie in der Flamme zu einer noch etwas feineren Spitze auszuziehen. Für Flüssigkeiten grosser Viskosität empfiehlt sich im Gegenteil die Verwendung gewöhnlicher Glasröhren von einem Durchmesser von 5-6 mm. Auch diese werden zu einer Spitze ausgezogen, jedoch derart, dass die verjüngte Strecke des Rohres möglichst kurz ist. Leider ist es aber durchaus nicht so, dass jede Düse geeigneter Form und gleicher Öffnungsweite wie die erwähnten, für die Versuche wirklich passt. Vielmehr müssen für jede Flüssigkeit einige Dutzend Düsen angefertigt und durchprobiert werden, eine Arbeit, die weniger schwierig als langweilig ist. Hat man endlich eine passende Düse gefunden, ist es wiederum nicht so, dass die Versuche mit ihr absolut reproduzierbar sind. Ist beispielsweise Wasser in die Düse eingedrungen, so scheint dieses eine Art Mantel zwischen Glas und hydrophober Flüssigkeit zu bilden und die Berührung zwischen beiden für eine gewisse Zeit zu verhindern: die Tropfen werden kleiner. Ist umgekehrt der äussere Teil der Düsen Spitze durch Fett, Oel oder sonstwie verunreinigt, so bewirkt dies, dass sich die zu emulgierende Flüssigkeit aussen rings um die Spitze « anhängt »: die Tropfen werden grösser. Auch sonst gibt es unangenehme Überraschungen, von denen die, dass die Düse während des Versuchs durch ein Luftbläschen oder sonstwie verstopft wird, noch die harmloseste ist.

Wie bereits erwähnt, lösen sich die Tropfen unter der Wirkung des von der elliptischen Scheibe auf den Hohlstempel ausgeübten

Schlages von der Düsen spitze ab. Damit nun die Kugeln in gleichmässiger Reihenfolge aus der Düse austreten, muss man bei hohen Geschwindigkeiten den Schlag des elliptischen Rades etwas dämpfen. Dies geschieht durch Verschieben des Behälters um einige mm nach vorn oder nach hinten. Der Grad der Verschiebung kann durch Schrauben (*Sch*) bewirkt werden, die an den vorderen beiden Trägerpfosten angebracht sind. Es werden auf diese Weise die Achse des elliptischen Rades und die des kleinen, am unteren Ende des Hohlstempels befindlichen Rädchens etwas von einander entfernt. Der Weg des Stempels wird dadurch kleiner und der Stoss abgeschwächt. Mit dem von uns verwendeten 1 P. S. Motor sind durch Änderung des Übersetzungsverhältnisses vier verschiedene Umdrehungszahlen zu erreichen. Wir arbeiten gewöhnlich bei 250 und 400 Umdrehungen, die wir durch entsprechende Transmission auf $\frac{1}{1}$ belassen oder auf $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{4}$ reduzieren. Es sind auf diese Weise 6 verschiedene Geschwindigkeiten möglich, nämlich $62\frac{1}{2}$, 100, 125, 200, 250 und 400 U/min. Diese entsprechen 125, 200, 250, 400, 500 und 800 Schlägen der ovalen Scheibe. Indessen ist es praktisch nicht mehr möglich, bei 400 U/min noch ein regelmässiges Abgehen der Kugeln zu erreichen, so dass diese Variationsmöglichkeit wegfällt. Es entspricht aber normalerweise nicht jedem Schlag eine Kugel; vielmehr entwickelt sich der Tropfen meist während des ersten Schlages und wird erst beim zweiten losgelöst. Erhöht man nun den auf der zu emulgierenden Lösung lastenden Druck, so kann man dazu gelangen, dass sich bei jedem Stoss eine Kugel löst. Dadurch ist eine weitere Variationsmöglichkeit gegeben. Um zum Beispiel zu 5 verschiedenen Geschwindigkeiten zu gelangen, wählten wir die folgenden Kombinationen:

| | | | | |
|----|-----------------|-----------|-----------|-----------------|
| 1. | Geschwindigkeit | 100 U/min | (circa !) | 78 mm Hg Druck |
| 2. | » | 125 U/min | (») | 78 mm Hg Druck |
| 3. | » | 200 U/min | (») | 105 mm Hg Druck |
| 4. | » | 220 U/min | (») | 165 mm Hg Druck |
| 5. | » | 250 U/min | (») | 214 mm Hg Druck |

Zur Erzielung des regelmässigen Abschlags der Kugeln wählten wir im Fall des Paraffins für die 1. Geschwindigkeit eine Düse von 116μ und für die Geschwindigkeiten 2-5 eine Düse von 413μ Durchmesser.

5. Temperaturkoeffizient.

Die Temperaturmessung im Wasserbehälter erfolgt mittels eines in Zehntel Grade eingeteilten Thermometers, den wir vor Gebrauch mit einem geeichten Thermometer verglichen haben. Bei unseren Versuchen brachten wir die Temperatur im Versuchsgefäss wie auch im Reservebehälter durch Zufügen erwärmten oder kalten Wassers auf 20° plus oder minus $0,05^{\circ}$. Die Temperatur des äusseren Raumes wurde ebenfalls auf 20° eingestellt, jedoch war es hier nicht möglich, Schwankungen von plus oder minus 1° auszuschalten.

Da, wie bereits erwähnt, der grössere Teil der Röhre sich ausserhalb des Wasserbehälters befindet, so konnten kleinere Temperaturunterschiede zwischen der im Behälter und der in der Röhre sich befindenden Flüssigkeit wohl auftreten. Der durch dieses Temperaturgefälle möglicherweise hervorgerufene Fehler lässt sich nicht genau einschätzen; er dürfte aber den Wert des Viskositätskoeffizienten kaum um mehr als 2% beeinflussen. Er fällt jedenfalls bei kleineren Geschwindigkeiten mehr ins Gewicht als bei grossen. Denn nicht nur das Zähigkeitsmass des Wassers wird durch die Temperatur beeinflusst, sondern aus drei Gründen noch mehr die Grösse der Kugeln. Erstens nimmt die Viskosität der zur Emulsion verwendeten Flüssigkeiten mit steigender Temperatur stark ab, wodurch die aus der Düse austretende Flüssigkeitsmenge vergrössert wird; zweitens sind die kubischen Ausdehnungskoeffizienten der von uns verwendeten Flüssigkeiten gegenüber dem des Wassers mehrmals grösser, weshalb sich die Kugel unter Umständen in der Röhre vergrössern kann; drittens wird der Druck in den Druckbehältern um rund $1/273$ pro Grad vergrössert, was ebenfalls auf eine Zunahme des Kugelvolumens hinwirkt. Bei einer Abnahme der Temperatur geschieht natürlich das Umgekehrte.

Nun wird zwar bei höherer Aussentemperatur, wenn das Wasser Zeit findet, in der Röhre die Temperatur der Aussenluft anzunehmen, sein Viskositätskoeffizient kleiner, die innere Reibung der Gesamtemulsion aber nimmt zu, weil die Grösse der Kugeln zunimmt. Letzteres wird sich um so stärker geltend machen dort, wo der Durchmesser einer Kugel nahezu identisch wird mit dem Rohrdurchmesser.

Die erwähnte Beeinflussung der Viskosität der Wassers kompensiert also in einem vorläufig noch nicht feststellbaren Mass die Beeinflussung der Kugelgrösse durch die letztgenannten drei Faktoren. Die auf diese Weise noch möglichen Fehler werden ausgeschaltet werden können, wenn man das ganze System in einen Luftthermostaten bringt, was wir gegenwärtig zu unternehmen im Begriffe sind.

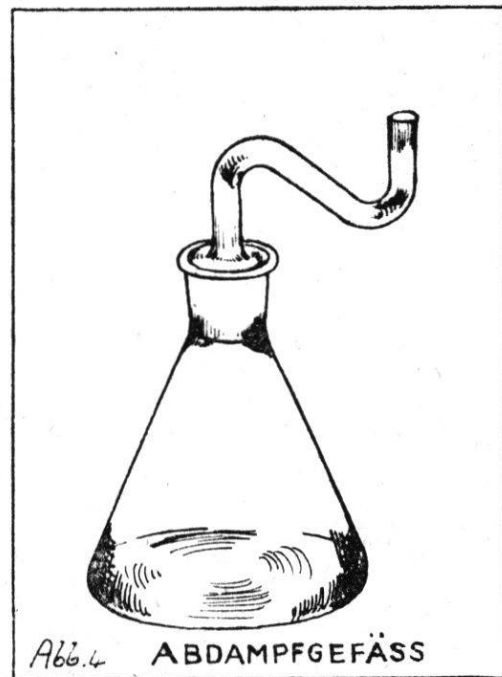
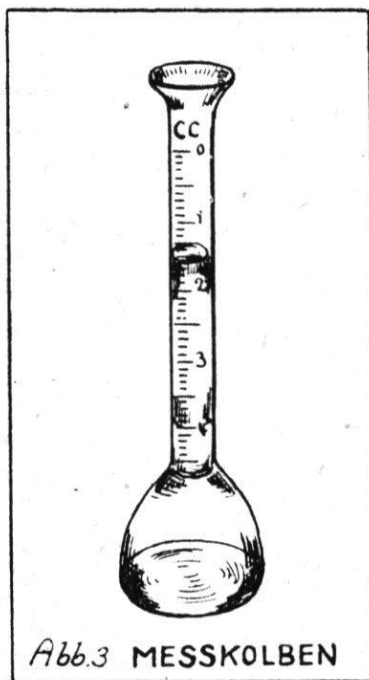
**6. Bestimmung der Ausflussmenge,
sowie der Konzentration des emulgierten Körpers in Volumprozent.**

Zur Bestimmung der ausgeflossenen Menge der Makroemulsion sowie zur Feststellung der darin enthaltenen Volumina emulgierter Flüssigkeit, fangen wir die ausfliessende Emulsion in einer oben trichterförmig erweiterten Bürette auf. Zuweilen (besonders für kleine Mengen bei verhältnismässig grosser Konzentration emulgierter Flüssigkeit) verwenden wir auch kleine Kölbchen von 15-100 cm³ Inhalt, an deren Hals ein Büettenrohr angeschmolzen ist (siehe Abb. 3). Man lässt in letzterem Fall soviel Emulsion einfliessen, dass die spezifisch leichtere emulgierte Flüssigkeit innerhalb des Büettenhalses sich befindet. Auf diese Weise kann gleichzeitig das Gesamtvolumen, wie auch das Volumen des emulgierten Anteils, abgelesen werden. Eine Fehlerquelle bei dieser Art der Volumbestimmung liegt allerdings in dem Auftreten verschieden ausgebildeter Menisken an den Grenzflächen Luft/emulgierte Flüssigkeit und emulgierte Flüssigkeit/Wasser. Um diesen Fehler möglichst zu verkleinern, haben wir uns darauf beschränkt, stets nur den unteren Meniskus abzulesen.

Wichtig für die praktische Ausführung einer solchen Volummessung ist, dass die Auffanggefässe zunächst peinlich mit Alkohol, dann mit Aether und schliesslich, nach dessen Verdunsten, mit warmer Chromschwefelsäure gereinigt werden. Andernfalls kann es geschehen, dass grössere Mengen der emulgierten Flüssigkeit an einer tiefer gelegenen Stelle haften bleiben und trotz ihres geringeren spezifischen Gewichtes nicht nach oben steigen. Auch bei gut gereinigten Gefässen erfolgt zuweilen ein Ankleben von Tropfen an der Wand unterhalb des Messbereiches; durch rasches, ruckartiges Drehen der Bürette in der Senkrechten, am besten zwischen

den beiden Handinnenflächen, gelingt es aber dann meist leicht, diese Tropfen wieder von der Wandung abzuschleudern.

Ist der Volumanteil der emulgierten Flüssigkeit gross, kann es vorkommen, dass sich umgekehrt Wassereinschlüsse in der Flüssigkeit finden, die sich auch nach längerem Stehen nicht senken. Dieser Übelstand wird behoben, indem man einen vorher in der Flamme ausgeglühten und dadurch aufgerauhten Kupferdraht (*r ca.*



200 μ) mit der emulgierten Flüssigkeit benetzt, und damit solange in dem Gemisch rührt, bis sich eine deutliche Trennung der beiden Schichten vollzogen hat. Natürlich muss man vor dem Herausnehmen des Drahtes alle daran haftende Flüssigkeit abtropfen lassen. Da auch die Ablesung bei 20° plus oder minus 1 Grad vorgenommen wurde, kann der Ausdehnungskoeffizient der emulgierten Flüssigkeit hier keinen grossen Fehler verursachen, keinesfalls einen Fehler, der den gewöhnlichen Ablesefehler bei Büretten übertreffen könnte. Der Ablesefehler beträgt maximal einen Bürettenteilstrich; er kann immerhin die Angaben der Volumprocente um ein 1/20 ihres Wertes fälschen. Der Fehler ist bei sehr kleinen Konzentrationen (kleines Volumen hydrophober Flüssigkeit!) und bei sehr grossen Konzentrationen (kleines Gesamtvolumen!) gross, klein bei mittleren Konzentrationen.

7. Bestimmung der Teilchengrösse.

Die Bestimmung des Durchmessers der Kugeln erfolgt in der Weise, dass bei einem bestimmten, auf der die Kugeln bildenden Flüssigkeit lastenden Druck, und bei einer bestimmten Umdrehungszahl der elliptischen Scheibe, eine grössere Menge der emulgierten Flüssigkeit aufgefangen wird. Bei ihrem Durchgang durch die Kapillare wurden die Kugeln lichtelektrisch gezählt. Die Zählung geschieht mittels des Zählers Z (s. Schema Abb. 2). Das durch eine Linse zentrierte Lichtbündel einer Niedervoltlampe passiert zunächst einen engen Spalt, sodann das Kapillarrohr und fällt schliesslich auf eine Photozelle. Jede vorübergehende Kugel verhindert für den Bruchteil einer Sekunde den Lichtdurchgang und überträgt so einen Impuls auf das Relais eines Zählwerkes.

Bei einiger Übung und einer genügend grossen Zahl von Kugeln gelingt es, die Zählung auf plus oder minus zwei genau vorzunehmen. Wir zählen meist 300-500 Kugeln. Das aufgefangene Gemisch Wasser/emulgierte Flüssigkeit wird alsdann in einen Scheidetrichter übergeführt und dort mit 100 cm³ Äther und ausgeschüttelt. Die wässrige Schicht wird abgelassen und verworfen. Die ätherische Lösung wird in einen gewogenen Erlenmeyer mit eingeschliffenen, N-förmigem Rohr gebracht (siehe Abb. 4). Auffanggefäss und Scheidetrichter werden wiederholt mit kleineren Mengen Äther nachgewaschen und der Waschäther ebenfalls in den Erlenmeyer überführt. Die so erhaltene ätherische Lösung ist natürlich stark mit Wasser verunreinigt. Um die darin enthaltene hydrophobe Flüssigkeit rein zu erhalten, wird zunächst auf einem Wasserbad der Äther weggedampft. Um lästiges Schäumen zu verhindern, ist es von Vorteil, einen gleichfalls gewogenen Siedestein in den Erlenmeyer zu verbringen.

Ist aller Äther weggedampft, wird der Erlenmeyer in ein Glycerinbad gebracht, das man langsam auf etwa 160-180° bringt. Die eingeschliffene, N-förmige Röhre wird jetzt aufgesetzt. Es ist nämlich unvermeidlich, dass während des nunmehr erfolgenden Wegdampfens des in der Flüssigkeit, z.B. Paraffinöl, noch befindlichen Wassers gelegentliches «Spratzen» des Oels auftritt. Das aufgesetzte N-Rohr verhindert aber, dass Spritzer des Oels fortgeschleudert werden. Vielmehr sammeln sie sich mit etwas Wasser

in der Krümmung des Rohres, und werden (nach vorheriger Abkühlung des Erlenmeyers!) mit etwas wasserfreiem Äther zurückgespült. Dies wird etwa 3-4 mal durchgeführt, und das Erhitzen dann noch solange fortgesetzt, bis keine Wasserdämpfe mehr aus dem N-Rohr entweichen. Alsdann wird der Erlenmeyer endgültig aus dem Bad genommen, abkühlen gelassen, von anhaftendem Glycerin durch Spülen mit Wasser befreit, gut getrocknet und schliesslich gewogen.

Die Gewichts-differenz zwischen den beiden Wägungen gibt uns das Gewicht der gezählten Kugeln. Man dividiert durch die Zahl der Kugeln und erhält so das Gewicht einer Kugel, letzteres dividiert durch das spezifische Gewicht gibt uns ihr Volumen. Daraus errechnet sich der Durchmesser einer Kugel:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot \frac{v}{\pi}}$$

Ein anderes Verfahren besteht darin, dass man eine grössere Anzahl Kugeln (mindestens 500) in einer möglichst schmalen, trichterförmig erweiterten Bürette auffängt, wobei man das gleichzeitig miteingeflossene Wasser von Zeit zu Zeit abfliessen lässt. Das Volumen der suspendierten Flüssigkeit kann dann direkt in cm^3 abgelesen werden. Hat man nicht eine sehr grosse Zahl von Kugeln gewählt, ist dies Verfahren natürlich weniger genau, als die oben beschriebene Bestimmung durch Wägung. Jedoch ist man bei Flüssigkeiten, die mit Wasserdampf leicht flüchtig sind, auf diese Art der Volumbestimmung angewiesen.

8. Versuchstabellen.

Die im Folgenden gegebenen Versuchstabellen sollen die im theoretischen Teil aufgestellten Behauptungen über den Einfluss der chem. Natur und der Grösse der emulgierten Kugeln, der Temperatur und der Geschwindigkeit auf den Viskositätskoeffizienten der Makroemulsion belegen. Die Berechnung des Viskositätskoeffizienten wurde mittels der bekannten Formel von Poiseuille vorgenommen:

$$\mu' = \frac{q^2 \cdot \tau \cdot p}{8 \cdot \pi l \cdot V}$$

in CGS-Einheiten:
$$\mu' = \frac{981 \cdot q^2 \cdot \tau \cdot p}{8 \pi \cdot l \cdot V}$$

Hierin bedeutet q den Querschnitt und l die Länge des Rohres, τ die Ausflusszeit in sec., p den Druck in cm Wassersäule und V das Volumen der ausgeflossenen Emulsion. Der Bequemlichkeit halber haben wir überall den 100 mal grösseren Wert des Centipoise in unseren Versuchstabellen zur Angabe des Zähigkeitsmasses verwendet.

Bei grossen Geschwindigkeiten ist es bekanntlich nötig die Druckhöhe p in der Formel um jenen Betrag zu reduzieren, der der ausströmenden Flüssigkeit nach Überwindung ihrer inneren Reibung noch eine zusätzliche kinetische Energie erteilt. Der Wert dieses Korrektionsfaktors wurde kürzlich von A. MÜLLER für verschiedene Fälle berechnet¹. Für unseren speziellen Fall einer teilweise gebogenen Röhre mit trichterförmiger Öffnung müsste dieser Korrekturfaktor experimentell ermittelt werden. Wir nehmen in der vorliegenden Arbeit.

$$P_{\text{kin}} = \frac{\bar{u}^2}{981} \quad (\bar{u} = \text{Geschwindigkeit})$$

als Korrektur und haben bei unseren Versuchen also als die nur zur Überwindung der inneren Reibung nötige Druckhöhe eingesetzt

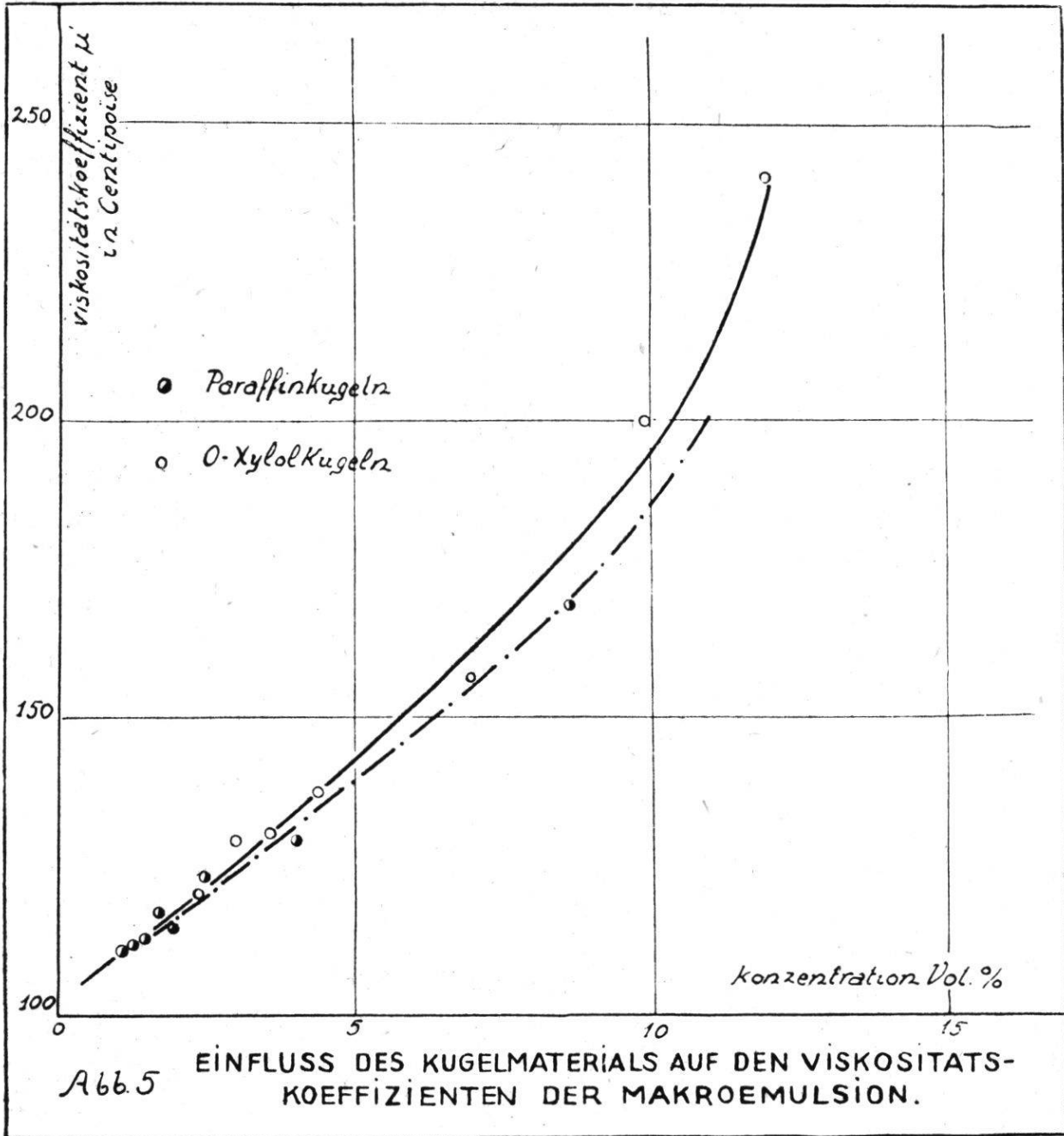
$$p_{\text{corr}} = p_{\text{gemessen}} - p_{\text{kin}}$$

Nicht berücksichtigt haben wir die Notwendigkeit einer Korrektur für den Fall des ganz langsamen Austropfens. Hier sollte der Einfluss der Oberflächenspannung entweder rechnerisch berücksichtigt oder durch eine besondere Abtropfvorrichtung eliminiert werden². In unserem besonderen Fall des Abtropfens zweier Flüssigkeiten mit verschiedener Oberflächenspannung und in zeitlich ändernder Aufeinanderfolge ist die mathematische Behandlung schwierig und auch die Verwendung eines Abtropfstäbchens nicht

¹ A. MÜLLER, Archiv für Kreislaufforschung 8, 249 ff (1941).

² A. MÜLLER, Abhandlungen zur Mechanik der Flüssigkeiten I. S. 14. (Verlag Universitätsbuchhandlung Fryburg 1936).

ohne weiters statthaft. Es liegt hier aber zweifellos eine Fehlermöglichkeit vor, welche die erhaltenen Viskositätswerte bei sehr kleinen Durchflussgeschwindigkeiten als unsicher erscheinen lässt.



Wir werden in späteren Untersuchungen trachten diese Fehlerquelle durch Verwendung eines senkrecht stehenden Rohres zu vermeiden.

Durch Auftragen der so ermittelten Viskositätskoeffizienten als Funktion der Konzentration erhalten wir, wie bereits erwähnt, « Grundkurven ». Die Versuchsreihen 1—2 geben Viskositätswerte für Kugeln aus o-Xylol und Paraffinöl als Kugelmateriale. Versu-

che mit Olivenöl und Amyloxyd, die prinzipiell gleich ausfielen, sollen an anderer Stelle Erwähnung finden. Abbildung 5 gibt die Grundkurven für die Versuchsreihen 1—2. Die Versuchsreihen 3—6 und die zugehörigen Grundkurven der Abbildung 6 zeigen den Einfluss der Temperatur. Der Einfluss der Geschwindigkeit ergibt sich aus den Versuchsreihen 7—11. Die Grundkurven hiezu sind in Abbildung 7 aufgetragen, während in Abbildung 8 die Konzentrationen der Versuche 7—11 als Funktion der jeweiligen Geschwindigkeiten aufgetragen sind. Aus Abbildung 7 und 8 können daher die Viskositätskoeffizienten für 5 verschiedene Konzentrationen extrapoliert werden. In der Abbildung 9 geben wir die ungefähren Werte des Viskositätskoeffizienten bei 5, 10, 15 und 20 Volumprozent sowie eine graphische Darstellung der Abnahme des Zähigkeitsmasses bei steigender Geschwindigkeit.

Bei allen im Folgenden erwähnten Versuchen wurde ein- und dieselbe Röhre verwendet. Ihre Länge betrug 142,4 cm und ihr Durchmesser 0,2816 cm.

VERSUCHSREIHE I

Einfluss des Kugelmaterials auf den Wert des Viskositätskoeffizienten bei verschiedenen Konzentrationen.

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: Paraffinöl Durchmesser $d = 0,2744$ cm,

Zähigkeitsmass: 68,54 Cp (bei 20°)

Verhältnis Kugeldurchmesser zum Rohrdurchmesser: 0,973 Schlagzahl des Motors: 250 = 125 U/min.

Auf der zu emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 7,8
Temperatur $t = 20,1^\circ$

| Ausgefll. Total-Volumen in cm ³ | Ausgefll. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Oel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess. mittlere Höhe in cm | Korrig. mittlere Höhe in cm | Visk Koeff. μ' |
|--|--|------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 99,8 | 1,0 | 1,0 | 70,2 | 22,79 | 15,30 | 14,79 | 1,106 |
| 100,0 | 1,2 | 1,2 | 73,8 | 21,72 | 14,60 | 14,12 | 1,109 |
| 100,6 | 1,4 | 1,4 | 84,3 | 19,13 | 13,00 | 12,62 | 1,126 |
| 99,4 | 1,6 | 1,6 | 100,2 | 15,91 | 11,00 | 10,74 | 1,152 |
| 100,3 | 1,8 | 1,8 | 120,8 | 13,31 | 9,05 | 8,87 | 1,137 |
| 100,0 | 2,4 | 2,4 | 167,7 | 9,56 | 7,00 | 6,90 | 1,232 |
| 100,1 | 4,0 | 4,0 | 248,3 | 4,89 | 5,75 | 5,70 | 1,290 |
| 100,0 | 8,6 | 8,6 | 413,0 | 3,88 | 3,85 | — | 1,688 |
| 25,0 | 4,2 | 16,8 | 328,7 | 1,22 | 3,3 | — | 4,619 |

VERSUCHSREIHE 2

Versuche zur Prüfung des Einflusses der Kugelmateriale auf den Wert des Viskositätskoeffizienten.

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: o-Xylol Durchmesser $d = 0,2304$ cm, Zähigkeitsmass: 0,807 Cp. Verhältnis Kugeldurchmesser / Rohrdurchmesser: 0,818.

Schlagzahl des Motors: 250 = 125 U/min.

Auf der zu emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 151
Temperatur $t = 20^\circ$

| Ausgefll. Total-Volumen in cm ³ | Ausgefll. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Oel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess. mittlere Höhe in cm | Visk. Koeff. μ' |
|--|--|------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 94,0 | 2,2 | 2,3 | 165,5 | 9,13 | 6,45 | 1,209 |
| 93,4 | 2,8 | 3,0 | 240,2 | 6,24 | 4,70 | 1,285 |
| 98,0 | 3,5 | 3,6 | 286,4 | 5,49 | 4,15 | 1,291 |
| 94,8 | 4,2 | 4,4 | 335,2 | 4,54 | 3,65 | 1,373 |
| 24,3 | 1,7 | 7,0 | 134,8 | 2,89 | 2,65 | 1,565 |
| 23,2 | 2,3 | 9,9 | 190,6 | 1,95 | 2,3 | 2,011 |
| 15,1 | 1,8 | 11,9 | 171,0 | 1,42 | 2,0 | 2,411 |

VERSUCHSREIHE 3

Untersuchung des Einflusses des Temperatur.

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: Paraffinöl Durchmesser $d = 0,2636$ cm.

Zähigkeitsmass: 68,54 Cp.

Verhältnis Kugeldurchmesser / Rohrdurchmesser: 0,936

Schlagzahl des Motors: 400 = 200 U/min.

Auf der emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 108
Temperatur $t = 17^\circ$

| Ausgefll. Total-Volumen in cm ³ | Ausgefll. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Oel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess. mittlere Höhe in cm | Korrig. mittlere Höhe in cm | Visk. Koeff. μ' |
|--|--|------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 98,4 | 3,2 | 3,25 | 104,0 | 15,17 | 11,35 | 11,11 | 1,251 |
| 99,2 | 4,6 | 4,6 | 152,5 | 10,43 | 8,15 | 8,04 | 1,315 |
| 99,2 | 5,8 | 5,8 | 189,8 | 8,38 | 6,95 | 6,88 | 1,401 |
| 49,5 | 3,8 | 7,7 | 134,1 | 5,92 | 5,55 | 5,51 | 1,589 |
| 24,4 | 2,3 | 9,4 | 71,0 | 5,51 | 5,40 | 5,37 | 1,673 |
| 23,9 | 3,0 | 12,6 | 98,7 | 3,88 | 4,50 | 4,48 | 1,978 |
| 20,1 | 4,1 | 20,4 | 150,0 | 2,15 | 3,70 | — | 2,939 |

VERSUCHSREIHE 4

Untersuchung des Einflusses der Temperatur.

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: Paraffinöl Durchmesser $d = 0,2688$ cm.

Zähigkeitsmass: 68,54 Cp.

Verhältnis Kugeldurchmesser / Rohrdurchmesser: 0,955

Schlagzahl des Motors: 400 = 200 U/min.

Auf der zu emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 106

Temperatur $t = 18^\circ$

| Ausgefl. Total-Volumen in cm ³ | Ausgefl. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Oel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess. mittlere Höhe in cm | Korrig. mittlere Höhe in cm | Visk. Koeff. μ' |
|---|---|------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 100,0 | 3,4 | 3,4 | 105,4 | 15,21 | 11,35 | 11,51 | 1,246 |
| 102,0 | 4,5 | 4,4 | 143,4 | 11,40 | 8,90 | 8,77 | 1,312 |
| 95,4 | 5,5 | 5,8 | 180,5 | 8,47 | 7,15 | 7,08 | 1,426 |
| 95,0 | 8,4 | 8,8 | 270,0 | 5,64 | 5,55 | — | 1,679 |
| 24,7 | 2,7 | 10,9 | 90,2 | 4,38 | 4,70 | — | 1,827 |
| 9,7 | 2,2 | 22,6 | 78,6 | 1,98 | 3,70 | — | 3,191 |
| 24,7 | 2,7 | 10,9 | 90,2 | 4,38 | 4,70 | — | 1,827 |

VERSUCHSREIHE 5

Untersuchung des Einflusses der Temperatur.

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: Paraffinöl. Durchmesser $d = 0,2456$ cm.

Zähigkeitsmass: 68,54 Cp.

Verhältnis Kugeldurchmesser / Rohrdurchmesser: 0,872

Schlagzahl des Motors: 400 = 200 U/min.

Auf der zu emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 105.

Temperatur $t = 19^\circ$

| Ausgefl. Total-Volumen in cm ³ | Ausgefl. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Oel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess. mittlere Höhe in cm | Korrig. mittlere Höhe in cm | Visk. Koeff. μ' |
|---|---|------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 99,2 | 7,4 | 7,5 | 206,4 | 7,71 | 6,80 | 6,74 | 1,490 |
| 94,6 | 10,8 | 11,4 | 307,5 | 4,93 | 5,15 | 5,12 | 1,708 |
| 25,3 | 3,4 | 13,4 | 102,3 | 3,97 | 4,60 | — | 1,980 |
| 22,8 | 3,2 | 14,0 | 98,0 | 3,73 | 4,40 | — | 2,013 |
| 23,4 | 4,7 | 20,1 | 148,8 | 2,53 | 4,00 | — | 2,700 |

VERSUCHSREIHE 6

Untersuchung des Einflusses der Temperatur.

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: Paraffinöl Durchmesser $d = 0,2456$ cm.

Zähigkeitsmass: 68,54 Cp.

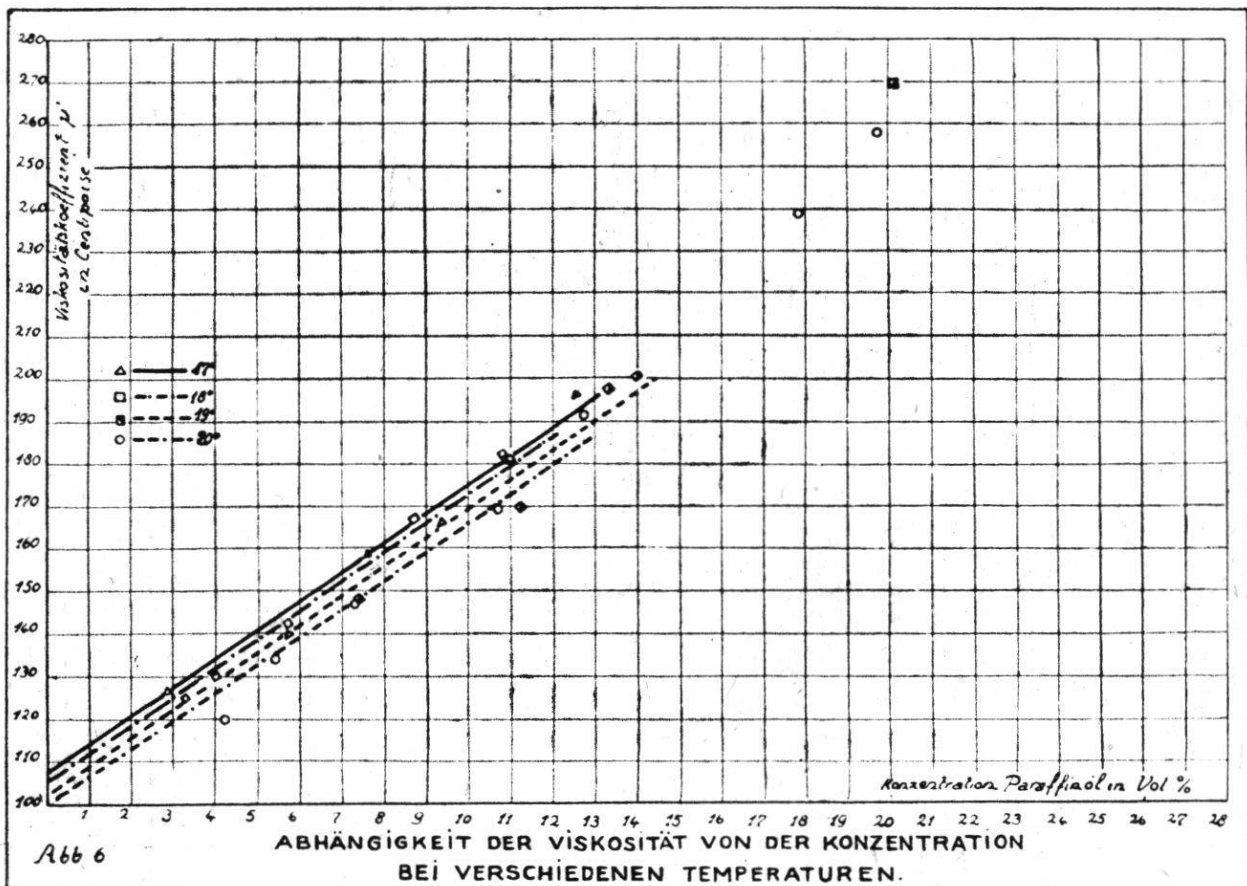
Verhältnis Kugeldurchmesser / Rohrdurchmesser: $\approx 0,872$.

Schlagzahl des Motors: 400 = 200 U/min.

Auf der emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 105.

Temperatur $t = 20^\circ$

| Ausgefl. Total-Volumen in cm ³ | Ausgefl. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Oel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess mittlere Höhe in cm | Korrig. mittlere Höhe in cm | Visk. Koeff. μ' |
|---|---|------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 100,0 | 4,2 | 4,2 | 109,7 | 15,31 | 10,75 | 10,51 | 1,199 |
| 98,6 | 5,3 | 5,4 | 148,4 | 10,65 | 8,45 | 8,34 | 1,339 |
| 98,8 | 7,2 | 7,3 | 204,2 | 7,76 | 6,75 | 6,69 | 1,470 |
| 95,8 | 10,2 | 10,6 | 275,8 | 5,57 | 5,55 | 5,52 | 1,691 |
| 23,1 | 2,9 | 12,6 | 85,2 | 4,34 | 4,90 | — | 1,924 |
| 23,6 | 4,2 | 17,8 | 120,5 | 3,14 | 4,50 | — | 2,390 |
| 23,3 | 4,6 | 19,7 | 132,1 | 2,83 | 4,30 | — | 2,593 |
| 22,4 | 5,1 | 22,8 | 152,0 | 2,36 | 4,10 | — | 2,961 |
| 24,0 | 5,2 | 21,6 | 164,2 | 2,34 | 4,05 | — | 2,951 |
| 23,8 | 5,7 | 24,0 | 167,1 | 2,28 | 3,95 | — | 2,952 |



VERSUCHSREIHE 7

Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Geschwindigkeit auf den Wert des Viskositätskoeffizienten. Geschwindigkeit 1¹

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: Paraffinöl Durchmesser $d = 0,2689$ cm.

Zähigkeitsmass: 68,54 Cp.

Verhältnis Kugeldurchmesser / Rohrdurchmesser: 0,953.

Schlagzahl des Motors: 200 = 100 U/min.

Auf der zu emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 78.
Temperatur $t = 20^{\circ}$

| Ausgefl. Total-Volumen in cm ³ | Ausgefl. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Oel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess. mittlere Höhe in cm. | Korrig. mittlere Höhe in cm | Visk. Koeff. μ' |
|---|---|------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 100,6 | 1,6 | 1,6 | 179,6 | 8,16 | 5,45 | 5,38 | 1,125 |
| 100,0 | 2,4 | 2,4 | 336,8 | 4,76 | 4,76 | — | 1,218 |
| 25,0 | 1,2 | 4,8 | 144,8 | 2,78 | 2,15 | — | 1,325 |
| 25,2 | 1,6 | 6,4 | 172,6 | 2,34 | 2,0 | — | 1,458 |
| 25,0 | 2,7 | 10,8 | 266,0 | 1,51 | 1,6 | — | 1,812 |

VERSUCHSREIHE 8

Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Geschwindigkeit auf den Wert des Viskositätskoeffizienten. Geschwindigkeit 2.

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: Paraffinöl Durchmesser $d = 0,2714$ cm.

Zähigkeitsmass: 68,54 Cp.

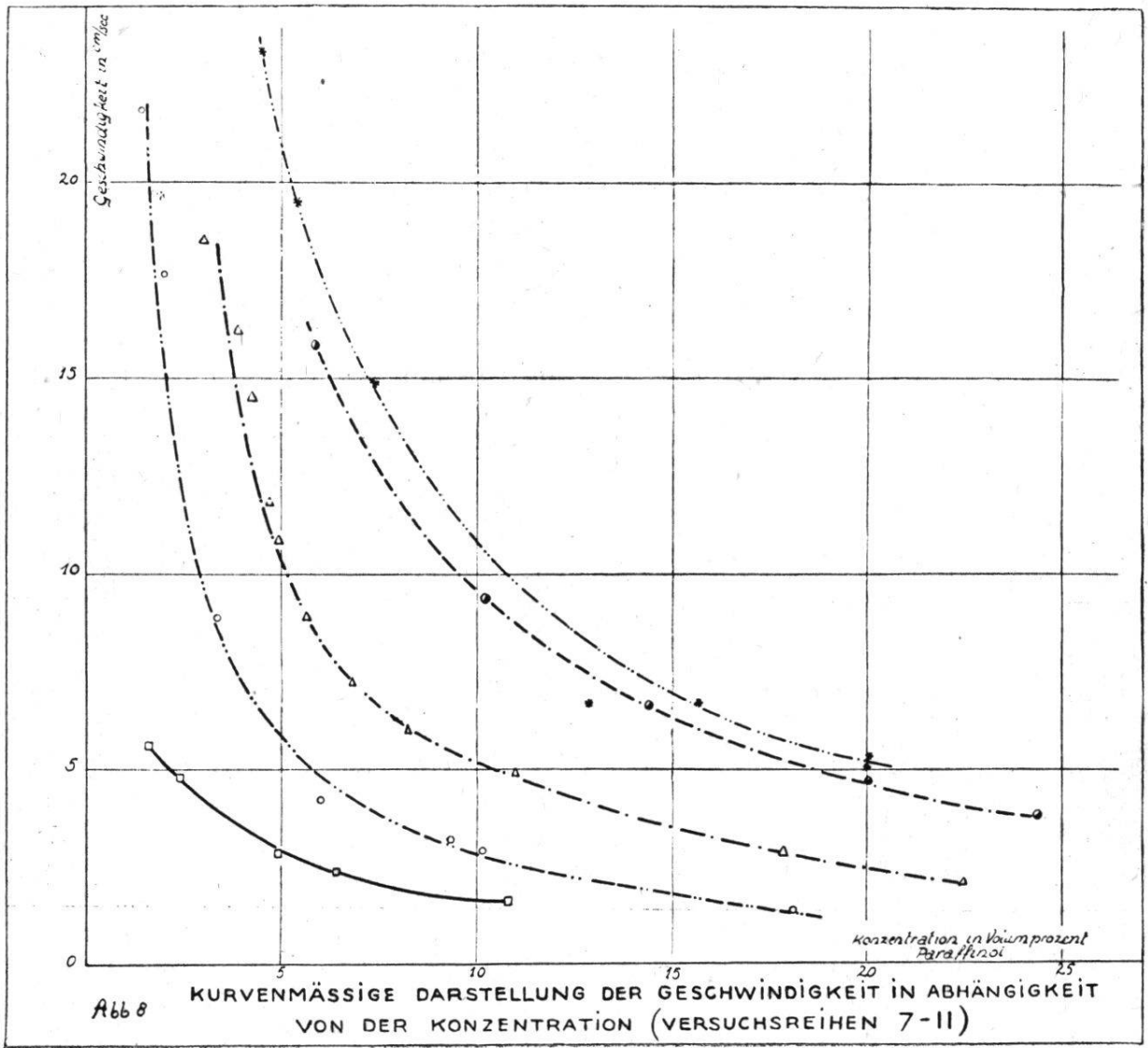
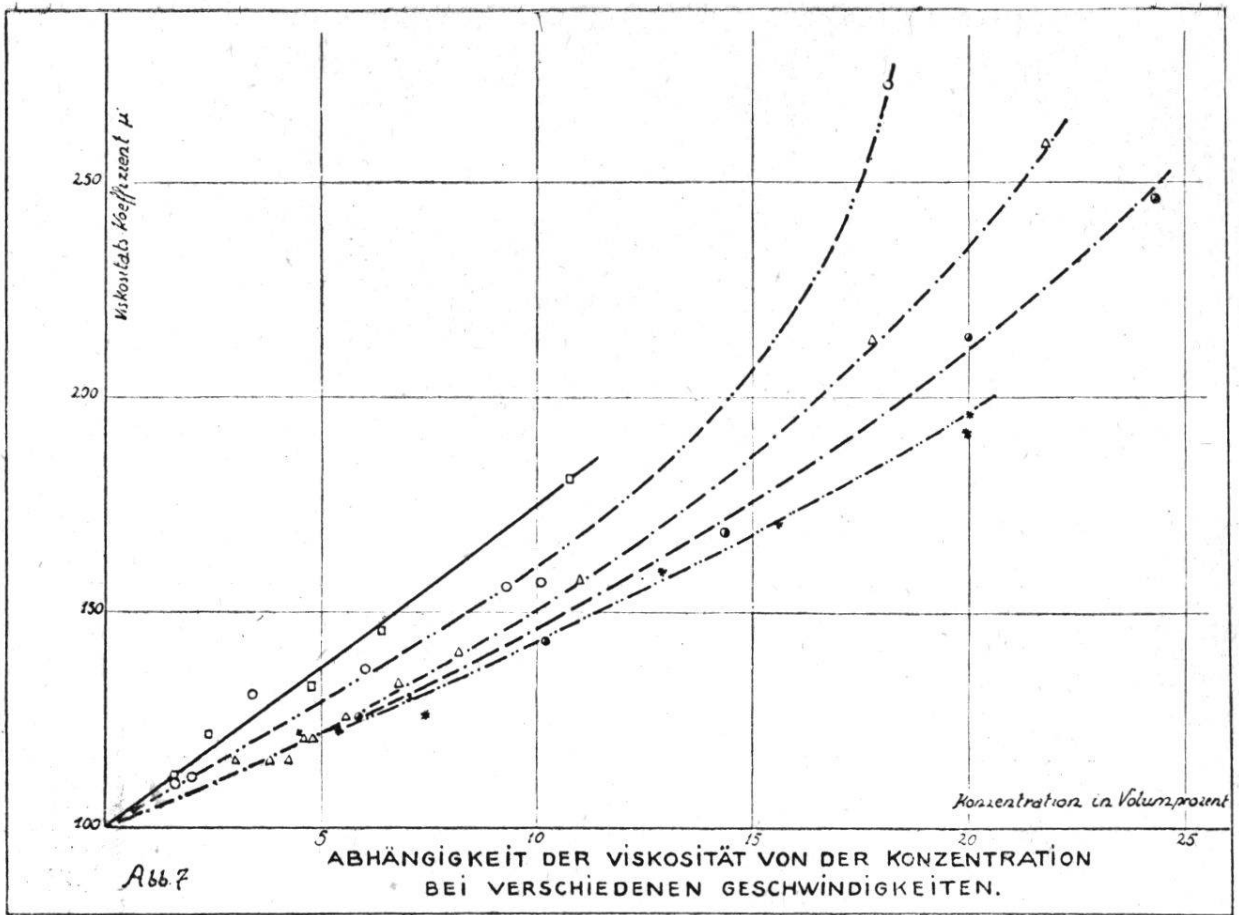
Verhältnis Kugeldurchmesser / Rohrdurchmesser: 0,964.

Schlagzahl des Motors: 250 = 125 U/min.

Auf der zu emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 78.
Temperatur $t = 20^{\circ}$

| Ausgefl. Total-Volumen in cm ³ | Ausgefl. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Oel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess. mittlere Höhe in cm | Korrig. mittlere Höhe in cm | Visk. Koeff. μ' |
|---|---|------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 98,8 | 1,6 | 1,6 | 73,0 | 21,92 | 14,65 | 14,15 | 1,099 |
| 100,0 | 2,0 | 2,0 | 91,0 | 17,62 | 11,85 | 11,53 | 1,117 |
| 99,9 | 3,4 | 3,0 | 181,0 | 8,85 | 6,90 | 6,82 | 1,315 |
| 100,1 | 6,0 | 6,4 | 308,3 | 5,21 | 4,20 | — | 1,377 |
| 49,6 | 4,6 | 9,3 | 246,8 | 3,22 | 2,95 | — | 1,562 |
| 50,5 | 5,1 | 10,1 | 284,3 | 2,94 | 2,75 | — | 1,572 |
| 20,5 | 3,7 | 18,1 | 239,0 | 1,37 | 2,2 | — | 2,730 |

¹ Vergl. hiezu 4. Abschnitt unten.



VERSUCHSREIHE 9

Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Geschwindigkeit auf den Wert des Viskositätskoeffizienten. Geschwindigkeit 3.

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: Paraffinöl Durchmesser $d = 0,2744$ cm.

Zähigkeitsmass: 68,54 Cp.

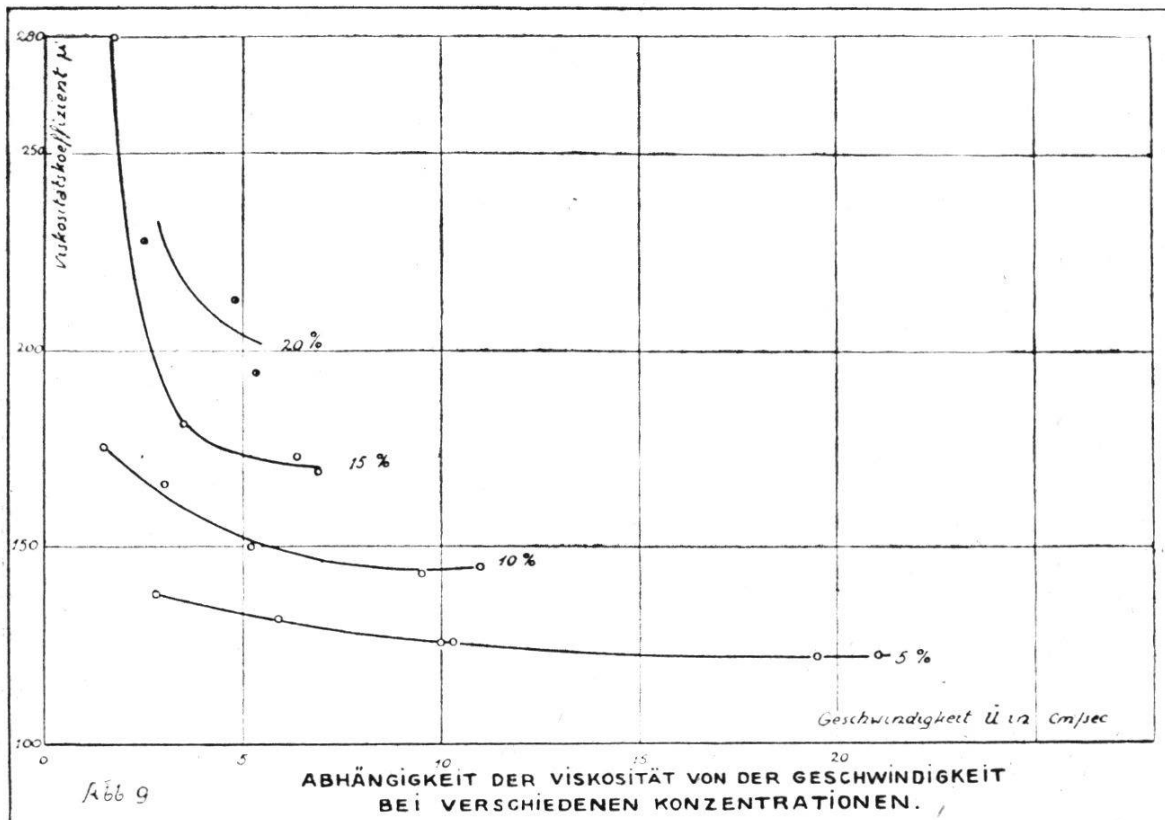
Verhältnis Kugeldurchmesser / Rohrdurchmesser: 0,974.

Schlagzahl des Motors: 400 = 200 U/min.

Auf der zu emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 106.

Temperatur $t = 20^\circ$

| Ausgef. Total-Volumen in cm ³ | Ausgef. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Oel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess. mittlere Höhe in cm | Korrig. mittlere Höhe in cm | Visk. Koeff. μ' |
|--|--|------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 100,1 | 3,0 | 3,0 | 84,8 | 18,50 | 13,25 | 12,89 | 1,160 |
| 49,8 | 1,9 | 3,8 | 49,5 | 16,17 | 11,20 | 10,93 | 1,157 |
| 49,8 | 2,1 | 4,2 | 53,7 | 14,53 | 10,25 | 10,03 | 1,151 |
| 49,5 | 2,3 | 4,65 | 67,3 | 11,80 | 8,50 | 8,36 | 1,210 |
| 49,5 | 2,4 | 4,85 | 75,0 | 10,85 | 7,60 | 7,49 | 1,201 |
| 49,8 | 2,8 | 5,6 | 90,6 | 8,81 | 6,60 | 6,52 | 1,262 |
| 49,9 | 3,4 | 6,8 | 111,3 | 7,19 | 5,70 | 5,65 | 1,341 |
| 50,0 | 4,1 | 8,2 | 133,5 | 6,00 | 5,00 | 4,96 | 1,409 |
| 49,8 | 5,5 | 11,0 | 168,0 | 4,79 | 4,40 | — | 1,580 |
| 50,0 | 8,8 | 17,8 | 277,0 | 2,89 | 3,60 | — | 2,123 |
| 25,2 | 5,5 | 21,8 | 191,5 | 2,11 | 3,20 | — | 2,588 |



VERSUCHSREIHE 10

Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Geschwindigkeit auf den Wert des Viskositätskoeffizienten. Geschwindigkeit 4.

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: Paraffinöl Durchmesser $d = 0,2670$ cm.

Zähigkeitsmass: 68,54 Cp.

Verhältnis Kugeldurchmesser / Rohrdurchmesser: 0,948.

Schlagzahl des Motors: 400 = 200 U/min.

Auf der zu emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 165.

Temperatur $t = 20^{\circ}$

| Ausgefll. Total-Volumen in cm ³ | Ausgefll. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Lel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess. mittlere Höhe in cm | Korrig. mittlere Höhe in cm | Visk. Koeff. μ' |
|--|--|------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 98,6 | 4,4 | 4,5 | 67,2 | 23,73 | 17,45 | 16,88 | 1,225 |
| 100,4 | 5,4 | 5,4 | 82,4 | 19,54 | 14,45 | 14,06 | 1,228 |
| 99,8 | 7,4 | 7,4 | 114,8 | 13,94 | 10,45 | 10,25 | 1,255 |
| 49,8 | 6,4 | 12,8 | 99,0 | 6,63 | 7,45 | 7,38 | 1,265 |
| 50,0 | 7,6 | 15,6 | 116,6 | 6,87 | 6,95 | 6,90 | 1,705 |
| 9,3 | 1,9 | 20,0 | 28,0 | 5,33 | 6,00 | — | 1,923 |
| 9,0 | 1,8 | 20,0 | 28,0 | 5,15 | 5,95 | — | 1,958 |

VERSUCHSREIHE 11

Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Geschwindigkeit auf den Wert des Viskositätskoeffizienten. Geschwindigkeit 5.

Verwendete Kugeln:

Chem. Natur: Paraffinöl Durchmesser $d = 0,2444$ cm.

Zähigkeitsmass: 68,54 Cp.

Verhältnis Kugeldurchmesser / Rohrdurchmesser: 0,869.

Schlagzahl des Motors: 500 = 250 U/min.

Auf der zu emulgierenden Flüssigkeit lastender Druck in mm Hg: 214.

Temperatur $t = 20^{\circ}$

| Ausgefll. Total-Volumen in cm ³ | Ausgefll. Oel-Volumen in cm ³ | Vol. % Oel | Ausfluss Zeit τ in sec. | Geschwindigkeit \bar{u} cm/sec. | Gemess. mittlere Höhe in cm | Korrig. mittlere Höhe in cm | Visk. Koeff. μ' |
|--|--|------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 100,0 | 5,8 | 5,8 | 100,9 | 15,90 | 12,00 | 11,74 | 1,261 |
| 98,0 | 10,0 | 10,2 | 167,2 | 9,41 | 8,05 | 7,94 | 1,442 |
| 98,6 | 14,2 | 14,4 | 238,5 | 6,63 | 6,65 | 6,60 | 1,699 |
| 98,2 | 19,6 | 20,0 | 335,1 | 4,69 | 5,9 | — | 2,143 |
| 98,0 | 23,8 | 24,3 | 412,8 | 3,81 | 5,5 | — | 2,463 |