

Teilchengewichtsbestimmung organischer Verbindungen mit Hilfe der Dialysenmethode^{*)}

Ein Beitrag zur Frage der Solvation gelöster organischer Substanzen (Auszug)

Von Doz. Dr. H. SPANDAU. Aus dem Anorganisch-Chemischen Institut der T. H. Braunschweig

Dialyse- und Diffusionsversuche zur Untersuchung des molekularen Verteilungszustandes organischer Nichtelektrolyte in polaren und unpolaren Lösungsmitteln ergaben wesentliche Erkenntnisse über Assoziations- und Solvationsverhältnisse und zeigten, daß die Dialysenmethode zur Teilchengewichtsbestimmung gelöster organischer Substanzen in organischen Lösungsmitteln grundsätzlich geeignet ist.

1. Einleitung und Problemstellung

Dialysen- und Diffusionsmethode sind in der anorganischen Chemie vielfach zur Bestimmung von Teilchengewichten in Lösung benutzt worden. Beide Methoden messen Wanderungsgeschwindigkeit, Diffusionskoeffizienten D bzw. Dialysekoeffizienten λ des gelösten Stoffes – Molekel oder Ion – und ergeben daraus das Teilchengewicht M auf Grund der einander entsprechenden Beziehungen:

$$(1) \quad \lambda \cdot \sqrt{M} = \text{konst.} \quad \text{bzw.} \quad D \cdot \sqrt{M} = \text{konst.}$$

Wie Untersuchungen an wäßrigen Elektrolytlösungen ergaben, liefern beide Methoden – zum Unterschied von den meisten anderen Verfahren zur Molekulargewichtsbestimmung – das wahre Gewicht der in Lösung vorliegenden Teilchen, d. h. das Gewicht der hydratisierten Ionen, da die Ionen mit ihrer Hydrathülle wandern.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Anwendung der Diffusions- und Dialysenmethode zur Teilchengewichtsbestimmung organischer Substanzen in verschiedenen Lösungsmitteln. Dabei ergab sich, daß auch die Untersuchung organischer Nichtelektrolyte mittels Dialyse oder Diffusion deren wirkliche Teilchengewichte, d. h. die Gewichte der infolge von Assoziation oder Solvation u. U. entstandenen Molekelverbindungen liefert und die gemessenen Wanderungsgeschwindigkeiten quantitative Aussagen über den Molekularzustand in Lösung gestatten.

Zur Untersuchung des Lösungszustandes wurden zahlreiche Dialysenmessungen gelöster polarer und unpolarer organischer Nichtelektrolyte in Wasser, wasserhaltigem 95,6proz. Äthylalkohol und wasserhaltigem 99proz. Dioxan durchgeführt. Die Messungen betreffen im wesentlichen das Gebiet der verdünnten Lösungen ($c < 0,1$ molar), nur bei einigen Beispielen sind sie auch auf höher-konzentrierte Lösungen bis $c_{\text{max}} = 10$ molar ausgedehnt, um an diesen Fällen den Einfluß der Konzentration auf die Zusammensetzung der in Lösung vorliegenden Teilchen festzustellen. In die Diskussion der eigenen Dialysenmessungen wurden die in der Literatur beschriebenen Diffusions- und Dialysenmessungen in verschiedenen Lösungsmitteln wie Wasser, Methanol, Äthanol, Benzol und Toluol mit einbezogen, da diese älteren Untersuchungen vielfach noch nicht im Hinblick auf evtl. Assoziations- und Solvations-Erscheinungen ausgewertet worden sind.

2. Assoziation und Solvation in organischen Systemen

Berechnet man aus den gemessenen Wanderungsgeschwindigkeiten nach (1) das wahre Teilchengewicht, so kann es mit dem theoretischen Molekulargewicht übereinstimmen oder größer sein als das theoretische Gewicht. Im letzteren Fall kann die gelöste Substanz assoziiert oder solvatisiert sein oder ein Assoziationskomplex kann seinerseits noch solvatisiert sein. Schließlich ist die Möglichkeit der Bildung von Mischassoziaten zu berücksichtigen, falls das Lösungssystem außer dem reinen Lösungsmittel und dem interessierenden gelösten Stoff noch eine dritte Komponente enthält. Aus den Diffusions- und Dialysenmessungen kann also der Molekularzustand in Lösung nur dann eindeutig erkannt werden, wenn in dem untersuchten System nur eine

einzigste der oben angeführten Erklärungsmöglichkeiten in Frage kommt.

Das in der Literatur vorliegende Beobachtungsmaterial über die Bildung und Existenz von Molekelkomplexen ist teils durch direkte kryoskopische Molekulargewichts-Bestimmungen gewonnen worden, teils indirekt aus dem dielektrischen oder spektroskopischen Verhalten der Lösungen oder aus Messungen von Mischungswärmen und Verdampfungswärmen.

Allgemein ist in konzentrierten Lösungen vornehmlich mit Assoziationen, in verdünnten Lösungen dagegen mit Solvationen zu rechnen. Darüber hinaus ist für den einzelnen Fall entscheidend, in welchem Größenverhältnis die einzelnen zwischenmolekularen Kräfte des betreffenden Systems zueinander stehen, d. h. also die Kräfte der Lösungsmittelmolekeln untereinander, die Kräfte der gelösten Molekeln untereinander und die Kräfte zwischen den gelösten und den Lösungsmittel-Molekeln.

a) Kryoskopische Untersuchungen

Die kryoskopischen Messungen erfassen lediglich die durch Assoziation bedingten Molekelkomplexe, nicht dagegen die infolge Solvation eingetretenen Veränderungen des Molekulargewichtes, da die Solvation die Anzahl der Teilchen des gelösten Stoffes nicht verändert.

In den Lösungsmitteln Wasser und Eisessig hat Beckmann keine Assoziationen festgestellt. In Benzol dagegen finden nach Messungen verschiedener Autoren Assoziationen statt, und zwar assoziieren die Alkohole, Phenole, organ. Säuren, Carbonyl-Verbindungen und Oxime bereits bei niedrigen Konzentrationen, während Kohlenwasserstoffe, Säureanhydride, Mercaptane und Thiophenole auch noch in relativ konzentrierten Lösungen in Form der Monomeren vorliegen sollen. Auch in Nitrobenzol, Dioxan und Äthylbromid assoziieren dieselben polaren Substanzen. Die Assoziation des gleichen gelösten Stoffes in verschiedenen Lösungsmitteln ist umso ausgeprägter, je unpolarer das Lösungsmittel ist.

Es gelten somit: Das Einführen polarer Gruppen in die als Lösungsmittel dienenden Verbindungen wirkt den Assoziationen entgegen. Das Vorhandensein polarer Gruppen in den Molekeln des gelösten Stoffes begünstigt dagegen die Ausbildung von Assoziationskomplexen. Lösungsmittel, in denen keine Assoziationen der gelösten Stoffe beobachtet werden, sind: Wasser, Fluorwasserstoff, einwertige Alkohole, Äther, Ketone und die aliphatischen Säuren, also Verbindungen mit großen Dipolmomenten.

Auch Mischassoziationen sind kryoskopisch vielfach festgestellt worden. Polare Substanzen, die in einem mehr oder weniger unpolaren Lösungsmittel ohnehin assoziieren, erfahren meist eine beträchtliche Erhöhung ihrer Assoziation, wenn ein weiterer polarer Stoff zusätzlich in dem Lösungssystem vorhanden ist, wobei gleichzeitig diese dritte Komponente in den Assoziationskomplex eingebaut wird.

b) Indirekte Methoden

Die Konzentrations-Abhängigkeit der Molekularpolarisation von Alkoholen in Hexan- bzw. Benzol-Gemischen gibt nach Wolf und Herold und Hennings Auskunft über die Assoziation der Alkohole in verdünnten Lösungen dieser beiden Lösungsmittel. Die gemessenen Mischungswärmen von Alkoholen mit Hexan und Benzol gestatten gleichfalls Rückschlüsse auf

^{*)} Die ausführliche Arbeit erscheint demnächst als Monographie 63 zur „Angewandten Chemie“ und hat einen Umfang von etwa 88 Seiten und 18 Abb. Preis voraussichtlich etwa 9.60 DM. Vorbestellungen sind zu richten an den Verlag Chemie, GmbH., Weinheim/Bergstraße. Bestellschein im Anzettel dieses Heftes.

den Molekularzustand in Lösung, wenn man sie über einen großen Konzentrationsbereich in Abhängigkeit von der Konzentration betrachtet. Es existiert eine Grenzkonzentration, unterhalb der die Mischungswärme einen konstanten Wert hat (vollständige Entassoziatio). Auch aus spektroskopischen Messungen können nach Mecke Rückschlüsse auf die Assoziationsvorgänge gezogen werden.

Einen indirekten Nachweis der Hydratation von Alkoholen in Wasser haben Goller und Wicke erbracht. Aus den gemessenen Dampfdrücken und Mischungswärmen dieser Systeme berechnen sie die partiellen Entropien der Alkohole in den wäßrigen Lösungen, die erheblich geringer sind, als dem idealen Verhalten entsprechen würde. Mit zunehmender Konzentration wird die Hydratation infolge Wirkung benachbarter Alkohol-Molekeln vermindert.

Über die Bildung und Existenz von Molekelverbindungen in Lösung kann man also aussagen:

1) In stark polaren Lösungsmitteln sind die gelösten Stoffe im allgem. vollständig entassoziert. In diesen Lösungssystemen wird man aber mit starken Solvatationen zu rechnen haben. Quantitative Angaben über die Zusammensetzung dieser Solvate sowie über einen evtl. Konzentrations-Einfluß fehlen noch.

2) Unpolare Lösungsmittel begünstigen bei polaren gelösten Stoffen die Bildung von Assoziaten, sowohl von Eigenassoziaten als auch ggf. von Mischassoziaten. Die Konzentrationsabhängigkeit ist derart, daß im allgem. mit zunehmender Verdünnung eine Entassoziatio erfolgt. Ob auch in diesen Systemen eine Solvatation erfolgt — zusätzlich zur nachgewiesenen Assoziatio oder vielleicht parallel gehend zur Entassoziatio —, ist bisher nicht bekannt.

3. Neue Dialyse-Messungen

Für eine große Anzahl organischer Substanzen wurde ihre Wanderungsgeschwindigkeit in Lösung nach der Dialysenmethode von Spandau bestimmt. Als Lösungsmittel wurden zunächst stark polare Stoffe gewählt, d. h. die entassozierend wirkenden Solventien Wasser, Äthanol und Dioxan; die Messungen wurden bei möglichst niedrig gewählten Konzentrationen ($c < 1/50$ mol.) des gelösten Stoffes durchgeführt. Dadurch konnte die Bildung von Eigenassoziaten der gelösten Substanzen mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Was die dialysierten Verbindungen anbetrifft, so wurden jeweils mehrere Vertreter der verschiedenartigsten und wichtigsten Stoffklassen untersucht, soweit sie in den einzelnen Lösungsmitteln hinreichend löslich waren.

Als beim Dialysevorgang evtl. störend sind Verdampfung des gelösten Stoffes und Osmose zu beachten, die experimentell ermittelt und rechnerisch eliminiert werden können.

a) Wasser als Lösungsmittel

Wertet man das Versuchsmaterial aus, indem man in Gleichung (1) für M die theoretischen Molekulargewichte einsetzt, so erhält man für $\lambda \cdot \sqrt{M}$ keine konstanten Werte, offensichtlich weil die theoretischen Teilchengewichte nicht die für die Lösung gültigen sind. Da unter den Lösungsbedingungen Assoziationen ausgeschlossen sind, können Änderungen der Teilchengewichte nur durch Hydratation erklärt werden. Eine feste Bindung mit den Lösungsmittel-Molekeln wird von solchen Substanzen eingegangen, die eine oder mehrere polare Gruppen in der Molekel enthalten, die zur Ausbildung einer Wasserstoffbrücke befähigt sind, d. h. von den gleichen Verbindungen, die in unpolaren Lösungsmitteln assoziieren.

Mit Gleichung (1) kann man die wahren Teilchengewichte in Lösung berechnen, wenn man den Wert der Konstanten kennt. Dieser resultiert aus Dialysenmessungen von Stoffen, die in wäßriger Lösung nicht hydratisiert sind. Der Massenunterschied der experimentellen gegenüber den theoretischen Molekulargewichten ergibt die Zahl der gebundenen Wasser-Molekeln.

Ein Zusammenhang zwischen der Hydratation und der Wasserlöslichkeit der betreffenden Verbindungen ist nicht zu erkennen. Vertreter der gleichen Stoffklasse haben trotz extrem großer Löslichkeits-Unterschiede die gleiche Hydratationszahl in verdünnter Lösung.

Entscheidend für die Hydratation ist das Dipolmoment des gelösten Stoffes. Dabei müssen die Dipolmomente der aktiven Gruppen für sich betrachtet werden, und nicht etwa das Gesamtmoment der Molekel.

Bei den vorliegenden Konzentrationen ($1/50$ bis $1/200$ molar) erhält man für jede polare Gruppe in der Molekel eine ganz bestimmte, kleine Hydratationszahl: 1 bzw. 2 bzw. 3 Molekeln H_2O pro polare Gruppe. Liegen mehrere polare Gruppen vor, so setzt sich die Gesamtzahl der angelagerten Wassermolekeln additiv aus den für die einzelnen Gruppen angegebenen Zahlen zusammen, sofern nicht gelegentlich aus sterischen Gründen oder infolge innermolekularer Wasserstoffbrückenbindung weniger Wassermolekeln angelagert werden. Die Hydratation wird mit zunehmender Konzentration kleiner.

b) Äthanol als Lösungsmittel

Bei Dialysen in 95,6proz. Äthylalkohol resultieren nach (1) gleichfalls keine konstanten Werte für die Produkte aus den gemessenen Dialysekoeffizienten und der Wurzel aus dem theoretischen Molekulargewicht. Lediglich für einige dipolfreie Substanzen ergibt sich eine Übereinstimmung der Werte für $\lambda \cdot \sqrt{M}$. Da diese letzteren Stoffe nicht zur Bildung von Molekelkomplexen, weder von Assoziaten noch von Solvaten, befähigt sind, bei ihnen also das wahre Teilchengewicht in Lösung mit dem Formelgewicht übereinstimmt, liefern sie den Wert für die Konstante in Gleichung (1) für das Lösungsmittel Äthanol. Mit Hilfe der Konstanten lassen sich in Äthanol die wahren Teilchengewichte in Lösung für alle dialysierten Substanzen berechnen. Die Differenzen zwischen den berechneten und theoretischen Gewichten können wieder durch die Annahme von Solvatationskomplexen gedeutet werden, oder aber wegen des Wassergehaltes des Äthanois, auch als Mischassoziate.

c) Dioxan als Lösungsmittel

Es wurde Dioxan mit einem H_2O -Gehalt von 1% verwendet. Dipolfreie Verbindungen bilden darin keine Molekelaggregate, sie gestatten daher die Berechnung der Konstanten für Dioxan in Gleichung (1). Mit Hilfe der Konstanten lassen sich die wahren Teilchengewichte der Dipolsubstanzen in Dioxan-Lösung berechnen.

Wegen des Wassergehaltes des Dioxans hat man bei der Deutung der Meßergebnisse wieder die Wahl zwischen der Existenz von Solvaten oder von Mischassoziaten. Eine Klärung brachten parallel angestellte kryoskopische Molekulargewichtsbestimmungen im gleichen Dioxan. Bei ihnen liefern nur die unpolaren Stoffe theoretische Gewichte, während die Dipolsubstanzen eine wesentliche Erhöhung ihrer Teilchengewichte aufweisen, also Mischassoziate bilden.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Kryoskopie und der Dialyse in wasserhaltigem Dioxan zeigt, daß unpolare Substanzen weder assoziiert noch solvatisiert sind noch Mischassoziate mit Wasser bilden, dagegen Dipolmolekeln Mischassoziate bilden, die ihrerseits noch solvatisiert sind. In letzterem Fall handelt es sich also um die komplexen Molekelaggregate: (Dipolmolekel — Wasser — Dioxan).

4. Auswertung älterer Diffusionsmessungen

Der Versuch, aus älteren, in der Literatur vorliegenden Diffusionsmessungen organischer Substanzen in Wasser und organischen Lösungsmitteln Rückschlüsse auf den molekularen Verteilungszustand zu ziehen, bietet erhebliche Schwierigkeiten.

Bei der Auswertung der Diffusionen organischer Nichteletrolyte in Wasser nach Messungen von Öholm und Thovet zeigt sich, daß die von Spandau angegebenen Hydratzahlen durchaus verträglich sind mit den Ergebnissen der alten Diffusionsmessungen. Das gleiche gilt für die Konzentrations-Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von Dipolsubstanzen in wäßriger Lösung.

Diffusionen in Methanol können in gewisse Parallele zu den Dialysen in Äthanol gesetzt werden. Während die dipolfreien Substanzen nicht solvatisiert sind, zeigen die gelösten Dipolmolekeln in Methanol eine Solvatation, deren Größe mit dem Dipolmoment ansteigt.

Aus den Diffusionsmessungen des Brombenzols in 12 verschiedenen polaren wie unpolaren Lösungsmitteln ergibt sich, daß die Solvatation beim Übergang vom unpolaren zum polaren

Lösungsmittel zunimmt und daß erwartungsgemäß im großen und ganzen eine gewisse Parallelität zwischen der Größe der Solvation und dem Dipolmoment des Lösungsmittels festzustellen ist.

5. Zusammenfassende Angaben über den Lösungszustand

Auf Grund der Ergebnisse der Dialyse- und Diffusionsversuche kann über den molekularen Verteilungszustand organischer Nichtelektrolyte in polaren Lösungsmitteln wie Wasser, Methanol, Äthanol, Dioxan bei Beschränkung auf verdünnte Lösungen ($c < 0,1$ molar) generell gesagt werden: Weder unpolare noch polare gelöste Substanzen zeigen eine Eigenassoziation. Ferner finden keine Solvationen statt, und es bilden sich auch keine Mischassoziate, wenn es sich bei dem gelösten Stoff um dipolfreie Molekeln handelt. Dipolsubstanzen sind dagegen in Wasser

und in wasserfreien polaren Lösungsmitteln solvatisiert, während sie in wasserhaltigen polaren Solventien zugleich Mischassoziate mit den Wassermolekeln und Solvate bzw. Molekelaggregate aus allen drei Komponenten bilden können. Die bei polaren Substanzen in verdünnter Lösung auftretende Solvation nimmt mit steigender Konzentration ab, während bei den dipolfreien gelösten Stoffen keinerlei Konzentrations-Einfluß festzustellen ist.

Demgegenüber existieren in unpolaren Solventien wie Cyclohexan oder Benzol Assoziate, Eigenassoziate, wie auch gegebenenfalls Mischassoziate, wenn der gelöste Stoff ein Dipolmoment hat. Die Eigenassoziation nimmt in unpolaren Lösungsmitteln mit wachsender Verdünnung ab, bis bei einer bestimmten Grenzkonzentration die vollständige Entassoziation erreicht i. t. Unterhalb der Grenzkonzentration tritt dann möglicherweise Solvation ein.

Eingeg. am 7. März 1950

[A 293]

Kritische Betrachtungen zur Dielektrometrie von Flüssigkeiten

Von Dr. H. H. RUST, Hamburg, Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg

Bei der Präzisions-Dielektrometrie mehrphasiger, flüssiger Systeme ist es wichtig, die mehr oder weniger, gelöst oder adsorbiert, auftretende Gasphase zu beachten, da sie das Meßergebnis verfälschen kann. Messungen der Dielektrizitätskonstanten von reinem CCl_4 vor und nach Entgasung mittels Ultraschall ergaben, daß nach der Gas-austreibung die Dielektrizitätskonstante um $2,27 \cdot 10^{-3}$ größer geworden war. Bei Anwendung der Ultraschall-Entgasung können möglicherweise chemische Umwandlungen eintreten.

Die Dielektrometrie dient durch Präzisionsmessung der Dielektrizitätskonstanten eines mehrphasigen Systems zur Bestimmung der Phasenanteile. Dieses Verfahren, für dessen Durchführung heute außerordentlich genaue Meßmethoden zur Verfügung stehen, setzt einen gewissen Mindestunterschied der Dielektrizitätskonstanten der einzelnen Phasen voraus. Es bietet ganz besondere Vorteile, wenn der Unterschied große Werte annimmt, wie z. B. bei momentlosen und dissoziierten Phasen im Extremfall. Dies trifft z. B. bei den Phasen Kohlenwasserstoffe und Wasser zu, falls von den Carbonsäuren abgesehen wird. Im allgem. liegt das Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten dabei um 15, so daß bereits Spuren von einer Phase dielektrometrisch nachweisbar werden und auch quantitativ zu erfassen sind. Dieser Spurennachweis interessiert bes. die Mineralölindustrie, da für viele Verwendungszwecke von Mineralölen, vor allem in der Elektrotechnik für Isolierzwecke, der Wassergehalt von großer Bedeutung ist und in engen Grenzen zu bleiben hat. Es handelt sich hierbei um Bestimmungen von Wassergehalten, die unter 10^{-3} Wassermolenbruch liegen. Die Dielektrizitätskonstante von Mineralölen liegt bei 2,5, die von Wasser bei 80; damit besteht ein erheblicher Unterschied zwischen beiden und es sind somit beträchtliche Meßgenauigkeiten zu erzielen.

Bei derartigen Feinbestimmungen von geringfügigen Unterschieden in der Dielektrizitätskonstante, z. B. bei reinem und Spuren von Wasser enthaltendem Mineralöl, könnten sich Änderungen der Dielektrizitätskonstante ergeben, die durch in der Flüssigkeit gelöste oder adsorbierte Gase verursacht sind. Es wäre also denkbar, daß ein Spuren von Wasser enthaltendes Öl gleichzeitig gelöste und adsorbierte Gase aufweist und dadurch eine Dielektrizitätskonstante gemessen wird, die der des reinen Öls entspricht.

Um die Größe der Abweichung der Dielektrizitätskonstante zwischen gasfreier und gashaltiger Flüssigkeit zu ermitteln, wurde eine Messung mit chemisch reinem Tetrachlorkohlenstoff durchgeführt. Das benutzte Dielektrometer ist eine Präzisionsapparatur, die unter Berücksichtigung der neuesten Erkenntnisse auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik entwickelt wurde¹⁾. Es können mit ihr Kapazitäts-Unterschiede von 10^{-15} Farad bestimmt werden.

Das Gerät weist gegenüber dem früher auf dem Markt befindlichen „Dielkometer“²⁾ erhebliche Vorteile auf. Es wird mit Netzanschluß an Stelle der lästigen Batteriespeisung betrieben, wobei die Konstanthaltung der Betriebsspannungen, die äußerst wichtig für einwandfreie

Arbeiten ist, mittels Zweifach-Kaskadenstabilisierung erfolgt. Die Präzisionsmessung der Kapazität geschieht nicht mehr wie früher mit dem unbequemen Überlagerungsverfahren (Einstellung eines Tonminimums mit Kopfhörer), sondern mit einem Zeigerinstrument, das die Resonanzüberhöhung eines für die zweite Harmonische der Frequenz des Meßkreises bemessenen Steuerquarzes sichtbar macht.

Die Gase werden mittels Ultraschall³⁾ ausgetrieben, der bekanntlich in Flüssigkeiten gelöste und adsorbierte Gase befreit und aggregiert, so daß die entstehenden Blasen durch Auftrieb entweichen können. Infolge der Absorption des Ultraschalls im durchstrahlten Medium – hier Tetrachlorkohlenstoff – entsteht Wärme, die wegen des Temperaturkoeffizienten der Dielektrizitätskonstanten das Meßergebnis fälschen würde. Die Untersuchung wurde deswegen bei konstanter Temperatur, schmelzendem Eis, durchgeführt. Die Versuchsanordnung geht aus Bild 1 hervor.

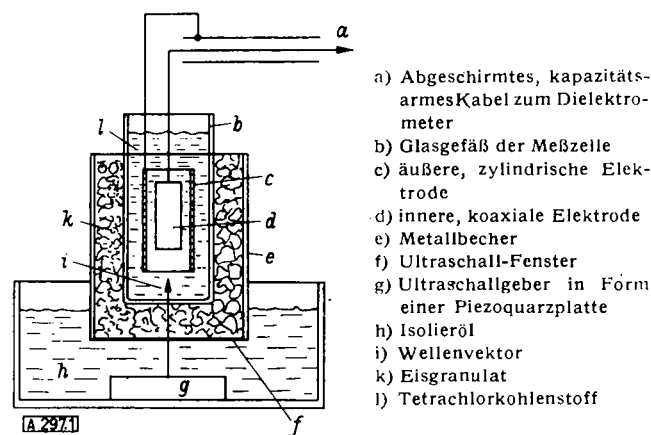


Bild 1

Anordnung zur Entgasung mit Ultraschall von dielektrometrisch zu untersuchenden Flüssigkeiten

Die zwei koaxialen Zylinder als Elektroden enthaltende Meßzelle befindet sich in einem Metallbecher, von Eisgranulat umgeben. Der Becher besitzt eine Bodenplatte in Form einer Aluminiumfolie, die einen hohen Durchlaßgrad für Ultraschall aufweist. Der Boden des Bechers taucht in ein Isolierölbad, in dem der Quarz-Ultraschallgeber⁴⁾ untergebracht ist.

Um das Temperaturgefälle zwischen Eisgefäß und Isolieröl möglichst niedrig zu halten, wurde das Öl durch Einbringen fester

¹⁾ L. Bergmann: Der Ultraschall, Stuttgart 1949.

²⁾ Betriebsfrequenz 570 kHz, Quarzplatten-Ø 30 mm, abgestrahlte Gesamtleistung 18 Watt, Wechselanodenspannungsbetrieb. Die Ultraschalleistung beträgt in der Meßzelle, roh geschätzt, ca. 5 Watt, da infolge Reflexion am Becherboden und bes. an der Wandung des aus relativ dickem Glas hergestellten Meßzelleengefäßes der resultierende Durchlaßgrad klein ist.

³⁾ Dipola-DK-Meßgerät, freundlicherweise von der Fa. H. Schoess, Hamburg, zur Verfügung gestellt.

⁴⁾ L. Ebert, diese Ztschr. 47, 305 [1934]; R. Heinze, M. Marder, K. H. Döring u. K. Blechstein, Öl u. Kohle 1, 8 [1941].