

3. Neue Methode zur Messung der Magnetisierungskoeffizienten der Flüssigkeiten; von G. Athanasiadis.

Die meisten der Methoden, die zur Messung der Magnetisierungskoeffizienten verschiedener Flüssigkeiten von Forschern angewandt wurden, beziehen sich auf die Bestimmung des magnetischen Moments, das der zu untersuchende Körper unter dem Einfluß des magnetischen Feldes annimmt. Nur einige Physiker haben Induktionsmethoden angewandt, wie Townsend¹⁾, Borgmann (1878) und Zillof (1880).

Für die Flüssigkeiten wird den drei folgenden Methoden der Vorzug gegeben:

1. Die Methode von Faraday (mit deren Hilfe Faraday, Becquerel, Weiß, Schumeister, Curie, Fleming und Dewar gearbeitet haben).

2. Die Methode des *Zylinders*, auf die Gouy²⁾ hingewiesen hat (Henrichsen, Stearns, Wills, Scarpa) und

3. Die Methode von Quincke³⁾ (Quincke, Wähner, Königsberger, Jäger und Meyer, Piaggese, Sève).

Die Apparate, die die verschiedenen Beobachter verwendet haben, sind mannigfaltig, und die obenerwähnten Methoden beanspruchen Präzisionsapparate und besondere Zusammenstellungen zur Vermeidung der Beobachtungsfehler, infolgederen ihre Anwendung weder leicht noch handlich ist.

Eine lange Reihe Messungen hat uns dazu geführt, eine neue Methode zur Bestimmung des Suszeptibilitätskoeffizienten (μ) der Flüssigkeiten, welche in bezug auf Einfachheit der Apparate und Leichtigkeit der Messungen den anderen Methoden entschieden überlegen ist auszuarbeiten, die in jedem nicht gleichmäßigem Felde leicht angewandt werden kann.

1) Townsend, Proc. Roy. Soc. London **60**. S. 186. 1898.

2) G. Gouy, Compt. rend. **109**. S. 935. 1889.

3) G. Quincke, Wied. Ann. **24**. S. 375. 1885.

Prinzip der Methode. Wenn ein Körper kleiner Dimension (z. B. kleiner Tropfen einer Flüssigkeit) in ein ungleichmäßiges magnetisches Feld gebracht wird, so unterliegt er der Wirkung einer Kraft f , welche den Körper nach einer bestimmten Richtung xx zu bewegen sucht.

Sei v das Volumen des Körpers, u sein Suszeptibilitätskoeffizient. Die Kraft ist dann:

$$(1) \quad f = u v H \frac{dH}{dx},$$

f ist die Kraft in Dynen, und das Volumen des Körpers v in Kubikzentimeter in C.G.S.-Einheiten. Das Volumen des Körpers muß genügend klein sein, so daß im Raume, den der Körper beansprucht, das Feld H und die Ableitung dH/dx genügend konstant sein können.

Dieses ist das Prinzip der Methode, die Faraday, Curie und Weiß angewandt haben, indem sie die Flüssigkeit in einem kleinen Glasgefäß an eine Wage angehängt gebracht hatten.

Die Methode von Faraday haben wir in einer ganz anderen Weise angewandt.

Angenommen, daß ein Tropfen (Fig. 1) einer Flüssigkeit in ein ungleichmäßiges magnetisches Feld (z. B. elektromagnetisches Feld mit keilförmigen Polen) gebracht wird und aus der Mündung eines Rohres durch das magnetische Feld fallen gelassen. Sollte die Flüssigkeit *diamagnetisch* sein und der Tropfen am Anfang oberhalb des Raumes, wo das magnetische Feld gleichmäßig ist, sich befinden, z. B. am a , so unterliegt sie der Wirkung einer Kraft, die von unten nach oben wirkt. Falls aber der Tropfen aus dem Punkte c , welcher sich unterhalb des Raumes in dem das Feld gleichmäßig ist, befindet, so unterliegt der Tropfen einer Kraft, die von oben nach unten wirkt.

Im zweiten Falle wird die Geschwindigkeit des Tropfens erhöht, wie Olivier und Sève¹⁾ beobachteten. Das Gegenteil findet bei paramagnetischen Flüssigkeiten statt. Aber außer der Änderung der Geschwindigkeit des Falles des Tropfens, ändert die aus dem Felde herstammende Kraft f auch das

1) P. Sève, Journ. de Phys. S. 774. 1907.

Volumen des Tropfens und infolgedessen auch die Zahl der Tropfen, die aus einem Tropftrichter herausfließen.

Wenn die Mündung des Rohres sich in a befindet und die Flüssigkeit diamagnetisch ist, so werden die Tropfen größer und infolgedessen deren Zahl kleiner (Fig. 1).

Wenn die Mündung sich in c befindet, werden die Tropfen kleiner und ihre Zahl größer. Das Gegenteil geschieht bei paramagnetischen Flüssigkeiten. Die Änderung der Tropfenzahl ist vom Platze des Feldes, in dem sich am Anfang der Tropfen gebildet hat, abhängig.

Durch Zählung der Zahl der Tropfen, die aus einem Tropftrichter, der ein bestimmtes Flüssigkeitsvolumen außerhalb des Feldes enthält, herausfließen und der Zahl der Tropfen, die dieses Flüssigkeitsvolumen ergibt, wenn der Tropftrichter ins Feld gebracht wird, können wir den Suszeptibilitätskoeffizienten entweder durch absolute oder relative Messung finden. Darin besteht unsere Methode.

Die absolute Messung. a ist der Tropfen der diamagnetischen Flüssigkeit im Momente des Losbrechens aus der Mündung des Rohres (Fig. 1), derselbe befindet sich oberhalb des Raumes, wo das Feld gleichmäßig ist.

Auf den Tropfen wirken drei Kräfte:
1. sein Gewicht, 2. Kapillaranziehung und
3. die aus dem Felde stammende Abstoßung f .

Es sei: $b_0 = 2\pi r a$ das Gewicht des Tropfens in Gramm außerhalb des Feldes (a = Kapillaritätskonstante, r = Radius des Kreises des Tropfenhalses).

b das Gewicht des im Felde sich gebildeten Tropfens und

$$f = uvH \frac{dH}{dx} \text{ dynen.}$$

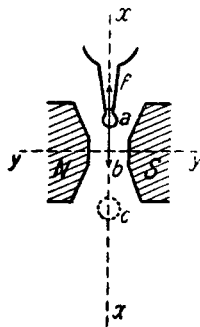


Fig. 1.

Da im Momente des Losbrechens des Tropfens sein Gewicht gleich ist der Summe der zwei anderen Kräfte, so werden wir haben

$$(2) \quad b_0 + f = b \text{ dynen.}$$

Jetzt sei: P das Gewicht der Flüssigkeit, die das bestimmte Volumen des Tropftrichters ausfüllt.

Gewicht des Tropfens außerhalb des Feldes: $b_0 = \frac{P}{N_0}$
(N_0 = die Zahl der Tropfen außerhalb des Feldes).

Gewicht des Tropfens im Felde: $b = \frac{P}{N}$ (N = die Zahl der Tropfen im Felde).

Das Volumen des Tropfens im Felde wird sein:

$$v = \frac{P}{Nd} \quad (d = \text{Dichte der Flüssigkeit}).$$

Aus der Gleichung (2) haben wir:

$$f = uvH \frac{dH}{dx} = (b - b_0)g = \left(\frac{P}{N} - \frac{P}{N_0} \right) g,$$

daraus

$$(3) \quad u = \frac{d \cdot (N_0 - N)}{N_0} g : \left(H \frac{dH}{dx} \right),$$

H ist die Mittelstärke des Feldes im Raume des Tropfens (in Gausseinheiten) und dH/dx die abgeleitete des Feldes in bezug auf die elementare Verschiebung nach der Achse xx . Infolgedessen können wir den Suszeptibilitätskoeffizienten der Flüssigkeit finden, wenn wir d , N_0 , N und das Produkt $H \frac{dH}{dx}$ wissen. Das Produkt $H \frac{dH}{dx}$ finden wir durch Bildung der Kurve der Werte des H nach der Länge der Achse xx und durch Messung von dH/dx .¹⁾

Relative Messung. Statt der absoluten Messung, die die schwer zu erreichende Bestimmung von $H \frac{dH}{dx}$ erfordert, ist ihrer Seichtigkeit und Zuverlässigkeit wegen, die relative Messung vorzuziehen.

Wir füllen den Tropftrichter mit einer Flüssigkeit, deren Koeffizient u bekannt ist (z. B. Wasser), und zählen die Tropfenzahlen N_0 und N außerhalb und im Felde, indem wir die Mündung des Rohres in jenen Punkt bringen, wo wir das Maximum der Differenz $N_0 - N$ finden, was wir einmal für alle durch Probieren bestimmen.

Nachher füllen wir den Tropftrichter mit dem gleichen Volumen der Flüssigkeit, von der wir den Koeffizienten u'

1) P. Curie, Journ. de Phys. S. 197, 263. 1995.

suchen und bringen das Rohr ungefähr an denselben Platz (daß die Mittelpunkte der Tropfen der zwei Flüssigkeiten sich auf demselben Punkt des Feldes befinden), wobei das Produkt $H \frac{dH}{dx} = Q$ in beiden Fällen konstant ist.

Wir bestimmen die Zahlen ν_0 und ν der Tropfen der Flüssigkeit außerhalb und innerhalb des Feldes.

Nach dem oben Gesagten werden wir haben:

für Wasser:

$$b g - b_0 g = f \quad \text{oder} \quad \left(\frac{P}{N} - \frac{P}{N_0} \right) g = u \nu Q;$$

für die Flüssigkeit:

$$b' g - b'_0 g = f' \quad \text{oder} \quad \left(\frac{P'}{\nu} - \frac{P'}{\nu_0} \right) g = u' \nu' Q.$$

Wir nehmen: $\nu = \frac{P}{Nd}$ und $\nu' = \frac{P'}{\nu d'}$, und dividierend erhalten wir:

$$\frac{u}{u'} = \frac{d}{d'} \frac{(N_0 - N) \nu_0}{(\nu_0 - \nu) N_0},$$

daraus

$$(4) \quad u' = u \frac{d'}{d} \frac{(\nu_0 - \nu) N_0}{(N_0 - N) \nu_0}.$$

Aus dem Obenerwähnten ist ersichtlich, daß die Bestimmung des Koeffizienten u' durch die Zählung der Flüssigkeitstropfen N_0 , N , ν_0 , ν der zwei Flüssigkeiten und ihrer Dichte d und d' ausführbar ist.

Apparat. Unser Apparat ist sehr einfach. Er besteht aus einem Tropftrichter (Fig. 2) mit Kugel (nach Ducleau), der senkrecht und in der senkrechten Ebene sich befindet, die durch die Achse yy des Elektromagneten NS geht, so daß die Mündung o des Rohres sich in jenem Raume des Feldes befindet, wo wir die minimale Zahl Tropfen erhalten (für die diamagnetischen Flüssigkeiten).

Das Volumen der herausfließenden Flüssigkeit, welches sich zwischen den zwei Teilungen μ und μ_1 befindet, ist 5 ccm und der Durchmesser des Loches des Rohres $\varrho = 0,76$ mm, sein äußerer Durchmesser 3,17 mm. Das Feld wird durch einen starken Elektromagneten II (nach du Bois, von Hartmann & Braun bezogen), dessen Polstücke N und S wir in Form stumpfer Kegel bringen, in einer Entfernung von

8—9 mm voneinander ergänzt. Das Feld muß so stark wie möglich sein, damit man die größtmögliche Differenz $N_0 - N$ erreicht. In unseren Versuchen, die Intensität des Feldes an der Achse gemessen, war $H = 25000$ bis 30000 Gauss.

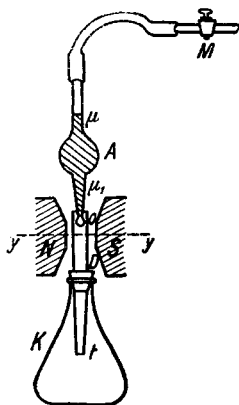


Fig. 2.

Da für die flüchtigen Substanzen (Alkohol, Benzol usw.) die Tropfenzahlen ν und ν_0 nicht konstant bleiben, da sie durch die schnelle Verdampfung der Flüssigkeit beeinflusst werden, ist es erforderlich, unter dem Tropftrichter eine Flasche K anzubringen, die mit einem Rohr D (Durchmesser 7 bis 8 mm) durch ihren Stopfen durchgehend und nach oben bis auf die Mündung o des Tropftrichters (oder auch noch höher reichend) versehen ist. In dieser Weise wird jeder Tropfen immer von einer durch Dämpfe der zu messenden Flüssigkeit umhüllt. Durch diese unerläßliche Anordnung haben wir eine absolute Konstanz der Tropfenzahl erreicht. Diese Anordnung des Rohres muß man immer, auch für die Vergleichsflüssigkeit (Wasser) anwenden, damit die Tropfen der verschiedenen Flüssigkeiten sich unter denselben Bedingungen im Felde befinden.

Die Geschwindigkeit des Herausfließens der Tropfen N und N_0 , infolgedessen auch die Tropfenzahl, wird durch den Hahn M geregelt und zwar wird sie für jede Flüssigkeit je nach ihrer Viskosität geregelt, damit die Zählung der Tropfenzahl geregelt wird. Hat man einmal den Hahn M für eine Flüssigkeit reguliert, so messen wir die Zahlen ν_0 und ν ohne seine Regulierung zu ändern.

Für das Wasser reguliert man den Hahn so, daß wir außerhalb des Feldes 100 Tropfen für das Volumen zwischen μ und μ_1 haben.

Experimentelle Ergebnisse. Indem wir die Entfernung der Polstücke des Elektromagneten unverändert hielten, änderten wir jedesmal die Stärke des im Elektromagneten existierenden Stromes und die Entfernung der Mündung des Tropftrichters von der Achse der Polstücke yy und bestimmten wir in der

Weise die entsprechende Tropfenzahl, so haben wir für die verschiedenen Flüssigkeiten charakteristische Tabellen des Verlaufes des Phänomens.

Die nachstehende Tab. I stellt die Änderung der Tropfenzahl von Benzin (spez. Gew. = 0,71) für verschiedene Stellungen der Mündung über (+) und unter (−) der Achse yy und für Stromstärken $I = 0, 2,5, 5, 7,5$ und 10 Ampere.

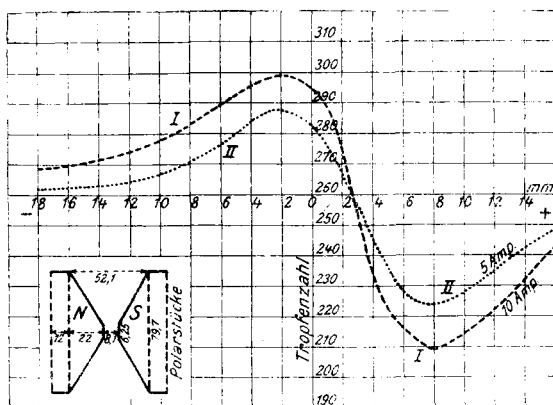


Fig. 3.

Diese Ergebnisse werden graphisch in Fig. 3 wiedergegeben. Kurve I gibt die Tropfenzahl von Benzin in Funktion der Entfernung von der Achse yy und für Stromstärke $I = 10$ Ampere, Kurve II für Stromstärke 5 Ampere.

Tabelle I.

Benzin.

| Ampere | Entfernungen der Mündung oberhalb der Achse yy in mm | | | | | Entfernungen der Mündung unterhalb der Achse yy in mm | | | | | Tropfenzahl |
|--------|---|-----|-------|-------|-------|--|-------|-------|-----|-------|-------------|
| | +20 | +15 | +7,35 | +3,25 | +2,45 | 0 | -3,25 | -6,75 | -15 | -20 | |
| 0 | 260 | 260 | 260 | 260 | 260 | 260 | 260 | 260 | 260 | 260 | } |
| 2,5 | 257 | 253 | 234 | 254 | 260 | 278 | 272 | 267 | 261 | 260,1 | |
| 5 | 255 | 248 | 225 | 250 | 260 | 282 | 287,8 | 273 | 262 | 261 | |
| 7,5 | 249 | 242 | 213 | 248 | 260 | 283 | 294 | 284 | 266 | 263 | |
| 10 | 243 | 238 | 210 | 244 | 260 | 295 | 297 | 287 | 268 | 265 | |

Aus dem Obenerwähnten bemerkt man, daß es einen Punkt des Feldes gibt (2,45 mm oberhalb der Achse) bei dem die Tropfenzahl gleich ist der Zahl der Tropfen, die außerhalb des Feldes erzeugt werden ($v_0 = 260$).

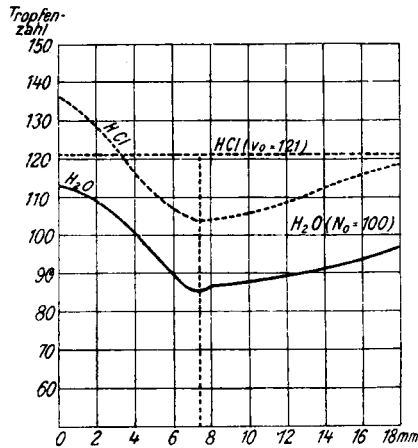


Fig. 4.

Oberhalb dieses Punktes nimmt das v bis zu einer Entfernung von + 7,35 mm ab, dann nimmt es wieder zu und wird gleich der Konstanten ($v_0 = 260$) außerhalb des Feldes (in einer Entfernung $\Delta = \text{ca. } 38 \text{ mm}$). Dagegen nimmt v von der Entfernung + 2,35 mm zu und erreicht sein Maximum in einer Entfernung von - 3,20 mm, unterhalb der Achse yy nimmt er dann allmählich ab und wird gleich 260 außerhalb des Feldes.

Ähnliche Kurven erhalten wir für verschiedene Flüssigkeiten. So gibt Fig. 5 Kurven für drei verschiedene Flüssigkeiten: Benzol ($d = 0,863$), Aceton ($d = 0,793$) und käufliches Benzin ($d = 0,71$), für welche die Tropfenzahlen außerhalb des Feldes sind:

| | |
|----------------|-------------|
| Benzol | $v_0 = 232$ |
| Aceton | $v_0 = 249$ |
| Benzin | $v_0 = 260$ |

Bei der relativen Messung ziehen wir für größere Genauigkeit der Messung diejenige Entfernung vor, bei der wir die niedrigste Zahl v (z. B. + 7,35 mm) finden.

daraus folgt

$$H \frac{dH}{dx} = \frac{15350 \times 1230}{0,1} = 18,88 \times 10^7.$$

Für das Wasser haben wir ($t^0 = 82$), $N_0 = 100$, $N = 86$ und $d = 1$.

Infolgedessen erhalten wir nach (3):

$$u = - \frac{14 \times 981}{100} : 18,88 \times 10^7 = - 0,727 \times 10^{-6}$$

Dieser Wert des u ist auch der von verschiedenen anderen Forschern im Jahre 1912 gefundene:

Henrichsen¹⁾ . . . ($u = - 0,72 \times 10^{-6}$),

Sève²⁾ ($u = - 0,72 \times 10^{-6}$),

Hass u. Drapier³⁾ ($u = - 0,73 \times 10^{-6}$),

A. Piccard ($u = - 0,72 \times 10^{-6}$).

Ergebnisse der relativen Messungen. Wegen der leichteren Durchführbarkeit der relativen Messungen haben wir bei unseren Forschungen dieser Methode den Vorzug gegeben. Die Mündung des Tropftrichters haben wir in einer Entfernung von + 7,35 mm gehalten, bei derselben finden wir das Maximum der Differenz für Wasser $N_0 - N$.

Wir haben

$$N_0 = 100, N = 86$$

und

$$u = - 0,72 \times 10^{-6} \text{ korrigiert (Sève).}$$

Die in nebenstehender Tab. II erwähnten Tropfzahlen ν_0 und ν haben wir gefunden indem wir in den Tropftrichter sukzessiv verschiedene Flüssigkeiten brachten, aus welchem wir mit Hilfe der Formel (4) den Koeffizienten u' (vorletzte Kolonne Z) bestimmten.

Aus dieser Tabelle geht die Genauigkeit und Sicherheit unserer Methode hervor. Die Ergebnisse unserer Messungen

1) S. Henrichsen, Wied. Ann. **45**. S. 38. 1892.

2) P. Sève, Journ. de Phys. **3**. 1912.

3) Hass u. Drapier, Verh. d. D. Phys. Ges. 1912. S. 761.

Tabelle II.

| | A. $\mu' \times 10^6$ | Dichte | t'' | μ'' | ν | Z. $\mu' \times 10^6$ | Dichte d |
|--|--------------------------|--------|-------|---------|-------|--------------------------|---------------|
| Toluol | -0,696 | 0,87 | 29° | 223,6 | 199 | -0,66 | 0,855 |
| Xylol | -0,706 | 0,87 | 29,5° | 225 | 198 | -0,70 | 0,85 |
| Ameisensäure | -0,592 | 1,22 | 29,5° | 230 | 207 | -0,60 | 1,195 |
| Chloroform | -0,858 | 1,49 | 29° | 426 | 378 | 0,85 | 1,405 |
| Terpentinöl | -0,78 | 1,49 | 29° | | | | |
| | -0,707 | 0,87 | 29° | 229 | 192 | -0,710 | 0,86 |
| Aceton | 0,516 | 0,80 | 29° | 246 | 215 | -0,52 | 0,798 |
| | | | 29° | 249 | 215 | -0,51 | 0,798 |
| Methylalkohol | -0,592 | 0,796 | 29° | 251 | 223 | -0,495 | 0,785 |
| Essigsäure | -0,602 | 0,795 | 29° | 258 | 224 | -0,54 | 0,792 |
| | -0,609 | 1,05 | 29° | 274 | 244 | -0,60 | 1,042 |
| Benzin | — | — | 29° | 260 | 210 | -0,69 | 0,705 |
| | | | 29° | 260 | 210 | -0,70 | 0,71 |
| H ₂ SO ₄ | -0,85 | 1,84 | 28° | 211 | 193 | -0,805 | 1,83 |
| | -0,77 | 1,833 | 30° | 209 | 192 | -0,76 | 1,82 |
| HCl | -0,77 | 1,165 | 28° | 128 | 112 | -0,77 | 1,18 |
| | | | 27,5° | 121 | 104,5 | -0,78 | 1,164 |
| HNO ₃ | -0,72 | 1,40 | 29° | 172,7 | 155,7 | -0,696 | 1,36 |
| | -0,65 | 1,387 | 31° | 170 | 153 | -0,704 | 1,37 |
| Benzol | -0,692 | 0,8° | 30° | 238 | 202 | -0,68 | 0,87 |
| | | | 26° | 235 | 200 | -0,67 | 0,87 |
| Äthylalkohol | -0,645 | 0,794 | 27° | 245 | 209 | -0,614 | 0,812 |
| | -0,639 | 0,789 | 26° | 255 | 215 | -0,636 | 0,788 |
| | — | — | 25,5° | 258 | 218 | -0,628 | 0,788 |
| Glycerin | -0,812 | 1,26 | 28° | 127 | 109,8 | -0,82 | 1,18 |

Kolonne A. enthält die Ergebnisse, die von verschiedenen Forschern gefunden wurden. Die vorletzte Kolonne Z. enthält die mit Hilfe unserer Methode gefundenen entsprechenden Resultate.

stimmen mit denen verschiedener Forscher, die mit Hilfe anderer Methoden arbeiteten, überein.

Die kleine Differenz einiger dieser Resultate ist einerseits auf das spezifische Gewicht, andererseits auf die Temperaturen zurückzuführen, da wir bei einer Temperatur von 26 bis 31° C. arbeiteten, während die meisten der anderen Forscher bei 20° C. arbeiteten.

Athen, Physikalisches Institut der Universität.

(Eingegangen 12. Oktober 1921.)