Bestimmung der Oberflächenspannung einer Seifenblase (OSP)

Stichworte: Kohäsionskräfte, Benetzung

1 Physikalische Grundlagen

Den Zusammenhalt (Kohäsion) zwischen den Molekülen einer Flüssigkeit bewirken die Kohäsionskräfte (Van der Waals-Wechselwirkung und Wasserstoff-Brückenbildungen). Während sich im Volumen der Flüssigkeit die Anziehungskräfte der Moleküle vollständig aufheben, resultiert für die Moleküle an der Flüssigkeitsoberfläche eine Kraft, die senkrecht zur Oberfläche ins Innere gerichtet ist. Die Moleküle an der Phasengrenzfläche besitzen daher eine potentielle Energie W_{pot} gegenüber jenen, die sich in einem isotropen Kraftfeld im Innern der flüssigen Phase befinden (siehe Abb. 1)

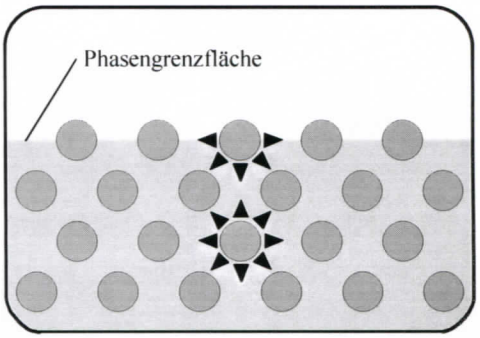


Abb. 1: Anisotrope Bindung an Phasengrenzflächen

$$\text{Oberflächenspannung} = \text{Oberflächenenergiedichte} = \frac{\text{pot. Energie d. Moleküle im Grenzbereich}}{\text{Fläche}} = \sigma = \frac{W}{A} \qquad \text{in } \frac{J}{m^2} = \frac{N}{m} = Pa \cdot m$$

Ein Flüssigkeitstropfen nimmt den niedrigsten Energiezustand ein, wenn das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen ein Minimum annimmt. Ein freier Wassertropfen bildet deshalb eine Kugel.

Soll der Tropfen auf einem (verschmutzten) Gegenstand auseinanderlaufen und ihn benetzen, müsste sich seine Oberfläche stark vergrößern. Das wird möglich, wenn dem Wasser Seife oder andere Tenside, das sind "oberflächenaktive Stoffe", zugesetzt werden. Diese Stoffe reduzieren die Oberflächenspannung.

Die Tenside bestehen aus länglichen Molekülen, deren eines Ende, das „hydrophile" in die Wasseroberfläche eintaucht, während das andere Ende, das „hydrophobe" heraussteht. Die Flüssigkeitsoberfläche ist daher nicht mehr von Wasser, sondern von Tensidmolekülen gebildet.

Beim Vergrößern der Flüssigkeitsoberfläche müssen die Moleküle, die in den Bereich der Phasengrenzfläche gelangen, die erforderliche Energie zum Ausbilden der Oberfläche in Form von äußerer Arbeit erhalten. Der Zusammenhang zwischen der freien Oberflächenenergie und der zugeführten Arbeit lässt sich sehr einfach an einer Seifenblase untersuchen. Die Stabilität einer Seifenlamelle (Abb.2) ergibt sich durch die (abstoßende) Wechselwirkung der an der Oberfläche ausgerichteten Tensidmoleküle.
Beim Aufblasen wachsen die innere und äußere Oberfläche der Seifenhaut aus einem Tropfen der Seifenlösung. Bei der Vergrößerung des Blasenvolumens um dV vergrößert sich die Oberfläche der kugelförmigen Seifenblase ($A = 4\pi r^2$) um 2 dA (wg. innen & außen).

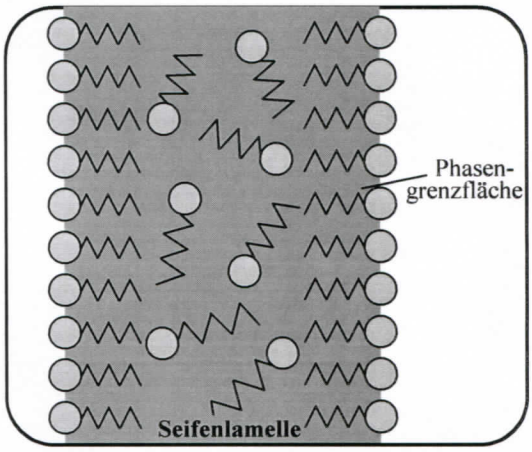


Abb. 2: Struktur eines Seifenfilms

Die zugeführte freie Oberflächenenergie dW beträgt daher

$$dW = 2 \cdot \sigma \cdot dA = 16 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot r \cdot dr \qquad \text{mit } dA = 8 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \tag{1}$$

Diese Energie wird bei der Volumenvergrößerung der Seifenblase um dV als Arbeit dW zugeführt:

$$dW = p \cdot dV = p \cdot A \cdot dr = 4 \cdot \pi \cdot p \cdot r^2 \cdot dr \tag{2}$$

Aus dem Vergleich beider Energien folgt:

$$p = \frac{4 \cdot \sigma}{r} \tag{3}$$

Wissen Sie jetzt, warum das Aufblasen eines Luftballons anfangs so schwer geht und beim großen Ballon leichter? Ziel des Experimentes ist es, einen mittleren Wert für die Oberflächenenergie anzugeben, der die Schwankungen einschließt, die durch unterschiedliche Präparation der Seifenblasen entstehen.

2 Versuchsanordnung

Die gleichzeitige Messung des Druckes und des Durchmessers der Seifenblase liefert den Wert der Oberflächenspannung der Seifenblase. Der Durchmesser der Seifenblase wird berührungsfrei mit vergrößernder optischer Abbildung gemessen. Das Abbildungsverhältnis zwischen der Gegenstands- und der Bildgröße wird experimentell durch Vergleich eines Strichmaßstabes mit seinem Bild bestimmt. Der Maßstab befindet sich an der Stelle des Objektes, in der Medianebene der Seifenblase. Die experimentelle Methode bietet die Möglichkeit, etwaige Abbildungsfehler festzustellen. Das Abbildungsverhältnis für den Innen- und Randbereich des Bildes kann verschieden sein.

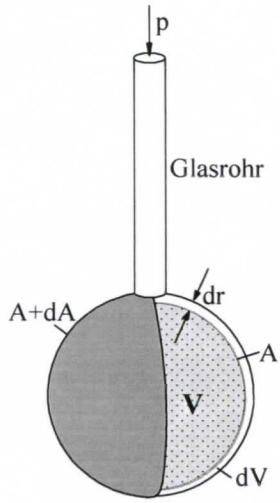


Abb. 3: Aufblasen einer Seifenblase

Druckmessung mit dem Schrägrohrmanometer:

Schrägrohrmanometer (Abb. 4) werden zum Messen kleiner Drücke eingesetzt. Als Messflüssigkeit dient Äthylalkohol. Das Messprinzip basiert auf dem hydrostatischen Druck p der Flüssigkeit:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \tag{4}$$

Durch Schräglegen des Manometerrohres im Winkel α kann man statt Δh die längere Strecke Δl der Flüssigkeitssäule messen:

$$\Delta l = \Delta h / \sin \alpha \tag{5}$$

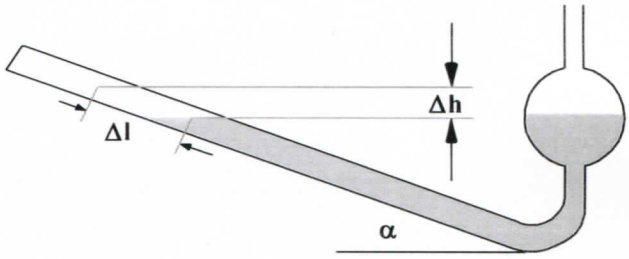


Abb. 4: Schrägrohrmanometer

- Die Neigung des Geräts wird durch sin α angegeben, z.B. 1 : 25.
- Der Kehrwert wird als Neigungszahl bezeichnet, z.B. 25.
- Der Druck (in Pa) ergibt sich aus Skalenablesung/Neigungszahl.

Justieren des Manometers:

Das Manometergehäuse ist im Gestell eingebaut und durch zwei Schrauben justierbar. Prüfen Sie, ob die Dosenlibelle richtig eingestellt ist; andernfalls ist die Aufsicht zu benachrichtigen. Nicht auf den Tisch stützen oder anlehnen, weil dadurch die Justierung verlorengeht.

Messbereichswähler auf die Stufe 1 : 25 einstellen und seine Wasserwaage mit der Stellschraube 1 (in der Mitte des rechten Gehäuserands) einstellen.

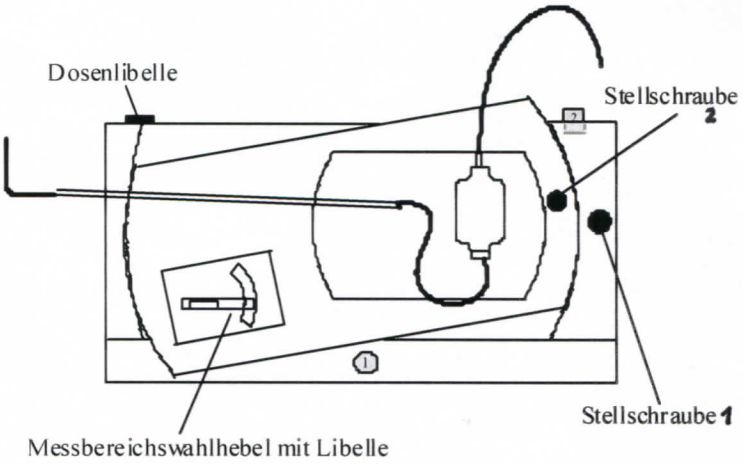


Abb. 5: Einstellmöglichkeiten

3 Versuchsdurchführung

3.1 Vorbereitung

- Spannen Sie ein kariertes oder Millimeterpapier unter die Halteleisten an der Projektionswand des Versuchsaufbaus.
- Legen Sie - nach Entfernen des Auffangtellers - den Strichmaßstab mit der Millimeterteilung an den Objektring unter dem Glasröhrchen; er wird magnetisch festgehalten. Bilden Sie den Maßstab scharf auf die Projektionswand ab; zum groben Fokussieren den Reiter mitsamt dem Objektiv (vorher Objektiv mit Rändelring in Mittelstellung bringen) verschieben, für das Scharfstellen nun das Objektiv am Rändelring verdrehen.
- Übertragen Sie die Millimeterteilung des Strichmaßstabes auf Ihr Papier an der Projektionswand. Hinterlassen Sie bitte keine Markierungen auf der Projektionswand!
- Entfernen Sie den Strichmaßstab und hängen den Auffangteller wieder ein.

Der Vergleich ihrer Messreihen kann Hinweise auf systematische Messfehler geben.

3.2 Durchführung

a) Dreiwegehahn öffnen (Stellung ⊣). Mit der Stellschraube 2 (siehe Abb. 5) das Vorratsgefäß für die Messflüssigkeit so anheben, dass die Flüssigkeitssäule am Skalenanfang steht. Mit der Kolbenspritze Luft ansaugen.

b) Hahn schließen (Stellung _|_). 1 bis 2 Tropfen Seifenlösung von oben in die Senkung der Glasröhrchenhalterung pipettieren. Die Flüssigkeit läuft von selbst *langsam* an die Spitze des Röhrchens.

c) Seifenblase l a n g s a m aufblasen. Es ist zweckmäßig, die Messung mit einer großen Blase zu beginnen und den Durchmesser schrittweise zu verringern. Wenn der Kolben im Zylinder „hakt", soll man versuchen, ihn leicht in der Führung zu drehen. Dadurch wird die Reibung überlistet.

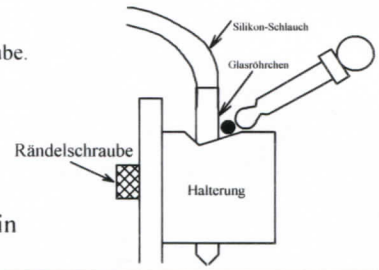
Markieren Sie die Blasendurchmesser des Bildes auf dem eingespannten Blatt und schreiben Sie den zugehörigen Druck dazu. Diese Werte später in ein Messprotokoll übertragen und das Blatt beilegen.

Notieren Sie auch, ob an der Blase ein (großer oder kleiner) Flüssigkeitstropfen hängt. Durch die Belastung mit dem Tropfen ist die Blase nicht mehr kugelförmig; für diesen Fall gilt die Theorie nur noch näherungsweise.

Geht die Seifenblase zu schnell kaputt, spülen Sie zunächst das Glasröhrchen:

- Ziehen Sie den Silikon-Schlauch ab.
- Lösen Sie die Halterung mit der Rändelschraube.
- Nehmen Sie die Halterung mit Glasröhrchen ab und spülen Sie beides mit Wasser durch.
- Wasser aus dem Röhrchen pusten.
- Abtrocknen.

Achtung: Glasröhrchen steckt nur lose in der Halterung! Festhalten!



d) Seifenblase zerstören.
Stimmt die Justierung des Manometers noch?

e) Mehrere Seifenblasen vermessen.

4 Auswertung

Durch die Messungen soll die Richtigkeit der Formel (3) $p = \frac{4 \cdot \sigma}{r}$ d.h. der reziproke Zusammenhang von p und r nachgewiesen werden. Danach kann die Oberflächenspannung σ bestimmt werden.

Messen Sie für 5-6 verschiedene Blasen möglichst viele Wertepaare Druck/Durchmesser.

Aus den Messdaten am Schrägrohrmanometer sind die Drucke p in der Seifenblase zu ermitteln. Aus der Bildgröße des Strichmaßstabs ergibt sich der Abbildungsmaßstab, und damit lassen sich aus den Blasendurchmessern D die Radien r und ihr Kehrwert bestimmen.

Die angegebene und hergeleitete Formel (3) ist eine zu prüfende Hypothese. Dazu werden drei verschiedene Ansätze gemacht.

Ansatz 1

Stellen Sie den Verlauf von p gegen r samt Unsicherheiten Δp und Δr für eine ausgewählte Messreihe grafisch dar. (Aus den Unsicherheiten von Δl und ΔD ergeben sich die Unsicherheiten Δp und Δr.)
Hinweis: Verwenden Sie ein Datenauswertungsprogramm hierfür.

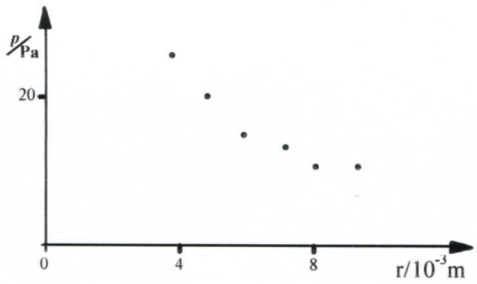


Abb. 6: Verlauf p gegen r

Ansatz 2

Tragen Sie den Verlauf von p gegen $1/r$ für jede Messreihe auf. Markieren Sie analog die Unsicherheiten Δp und $\Delta(1/r)$.

→ Beachte: Für die relativen Unsicherheiten gilt $$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta(1/r)}{1/r} \qquad (6)$$

Bestimmen Sie aus Ihrem Grafen mittels linearer Regression die Oberflächenspannung jeder Blase. Berechnen Sie aus den Einzelergebnissen die Oberflächenspannung der Seifenlösung inkl. Messunsicherheit. Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Oberflächenspannung von Wasser und Literaturwerten für Seifenlösung.

Bilden Sie einen Mittelwert über alle Geradensteigungen und ermitteln Sie daraus die Oberflächenspannung.

Optional: Ansatz 3

Wenn Wertepaare X, Y durch eine Potenzfunktion $Y = X^n$ verknüpft sind, dann kann der Exponent aus den Logarithmen bestimmt werden:

$$\log Y = n \cdot \log X \qquad (8)$$

Zeichnet man $\log Y$ gegen $\log X$ auf, ergibt sich eine Gerade mit der Steigung n. Dabei ist es zunächst unerheblich, ob z.B. der natürliche (ln) oder der dekadische (lg) Logarithmus verwendet werden; Logarithmen einer Zahl zu verschiedener Basis sind zueinander proportional.

Hier ist zu prüfen, ob die Wertepaare p_i, r_i gemäß dem theoretischen Formelansatz durch eine Funktion

$$p = c \cdot r^n \qquad (9)$$

beschrieben werden, danach ist n zu bestimmen.

Da Logarithmen nur von Zahlen gebildet werden können, muss die physikalische Größe deshalb durch ihre Einheit dividiert werden.

$$Y = \log\left\{\frac{p}{Pa}\right\} \; ; \quad X = \log\left\{\frac{r}{m}\right\}.$$

Der Ordinatenwert ist $\log\left\{\frac{p}{Pa}\right\}$, an der Achse wird $\frac{p}{Pa}$ angeschrieben.

Tragen Sie den Verlauf von p gegen r für jede Messreihe doppelt-logarithmisch auf.

Markieren Sie analog die Unsicherheiten Δp und Δr.

Ergibt sich in dieser Darstellung ein linearer Verlauf? Wenn ja, dann zeichnen Sie für die Messreihe eine Ausgleichsgerade ein und bestimmen Sie deren Steigung n.

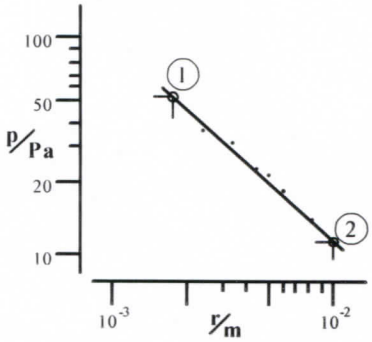


Abb. 8: Verlauf *log p* gegen *log r*

Falls sich $n \approx -1$ ergibt, ist die Abhängigkeit $p \sim r^{-1} = 1/r$ nachgewiesen.