

F4 Oberflächenspannung und Kapillarität

Grundlagen

Die Oberflächenspannung bzw. Grenzflächenspannung ist eine Eigenschaft einer Flüssigkeit in unmittelbarer Nähe einer Grenzfläche, wie z. B. zwischen Flüssigkeit und Luft. Ein Molekül im Innern der Flüssigkeit ist von gleichen Nachbarmolekülen umgeben. Demzufolge greifen an ihm nach allen Seiten gerichtete, betragsmäßig gleichgroße zwischenmolekulare Kräfte, die Kohäsionskräfte, an. Im Gegensatz dazu wirken auf ein Molekül der Oberflächenschicht nur auf der zur Flüssigkeit hin gerichteten Seite die zwischenmolekularen Kräfte der Flüssigkeitsmoleküle. Auf der anderen Seite wirken die wesentlich geringeren, meist vernachlässigbaren Kräfte der Moleküle des angrenzenden Gases, die Adhäsionskräfte. Die resultierende Kraft, die auf ein oberflächennahes Molekül wirkt, ist ins Innere der Flüssigkeit gerichtet.

Um die Oberfläche um δA zu vergrößern, müssen Moleküle aus dem Innern der Flüssigkeit in die Grenzschicht transportiert werden. Die hierzu erforderliche Arbeit W vergrößert die potentielle Energie der Moleküle. Die gesamte Zunahme der Oberflächenenergie ist

$$\Delta W = \sigma \Delta A, \quad (1)$$

wobei σ die spezifische Oberflächenenergie oder Oberflächenspannung ist.

Die Oberflächenspannung kann mittels Wägeverfahren bestimmt werden.

Beim Herausziehen einer dünnen Folie aus einer Flüssigkeit bildet sich eine dünne Flüssigkeitslamelle zwischen der Unterseite der Folie und der Flüssigkeit mit der Höhe Δs . Wenn die Folie die Länge l hat,¹ beträgt die Oberflächenzunahme demzufolge $2 \cdot l \Delta s$.² Die dazu geleistete Arbeit $\Delta W = F_\sigma \Delta s$ ist gemäß (1) proportional zur Flächenvergrößerung, die durch die Oberflächenspannung verursachte Kraft F_σ folglich konstant.³

Die Gewichtskraft G der Flüssigkeitslamelle steigt mit zunehmender Höhe Δs der Lamelle, bis sie bei $G_{max} = F_\sigma$ abreißt. Zur Bestimmung der Oberflächenspannung kann also die Gewichtskraft der Lamelle kurz vor deren Abreißen gemessen werden.

Es gilt

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\delta A} = \frac{F_\sigma \Delta s}{2 \cdot l \Delta s} = \frac{F_\sigma}{2 \cdot l} = \frac{G_{max}}{2 \cdot l}. \quad (2)$$

Jedes System ist bestrebt, in den stabilen Gleichgewichtszustand kleinster potentieller Energie zu gelangen. Demzu-

¹Aus praktischen Gründen wird die Folie zu einem Ring mit dem Umfang $2\pi r$ aufgerollt.

²Der Faktor 2 berücksichtigt, dass die Flüssigkeitslamelle zwei Oberflächen hat.

³Dieses Verhalten ist grundlegend verschieden als beispielsweise bei einer Gummimembran.

folge sind Flüssigkeitsoberflächen stets Minimalflächen⁴. Die Summe aller wirkenden Kräfte⁵ steht stets senkrecht auf der Oberfläche⁶. Die Stärke und Richtung der Kraft wird durch die Krümmung der Oberfläche bestimmt.

Um diesen Zusammenhang herzustellen, betrachtet man einen Flüssigkeitstropfen mit dem Radius r . Durch die Kohäsionskräfte wirkt ein nach innen gerichteter Druck $p = F/A = F/(4\pi r^2)$, welcher das Volumen des Tropfens bzw. seinen Radius um $dV = 4\pi r^2 dr$ verringert. Die damit verbundene Verkleinerung der Oberfläche beträgt $dA = 8\pi r dr$, die verrichtete Arbeit $dW = p dV$, so dass mit (1) für den Druck

$$p = \frac{2\sigma}{r} \quad (3)$$

folgt. Dieser ist also umgekehrt proportional zum Krümmungsradius der Oberfläche⁷

Grenzen Flüssigkeiten an feste Materialien, sind die Adhäsionskräfte an der Grenzschicht nicht vernachlässigbar. Sie werden sichtbar durch den Randwinkel, der sich zwischen Flüssigkeit und angrenzendem Medium bildet. Sind die Adhäsionskräfte größer als die Kohäsionskräfte, handelt es sich um eine benetzende Flüssigkeit mit einem Randwinkel θ kleiner als 90° , andernfalls um eine nicht benetzende Flüssigkeit mit einem Randwinkel größer als 90° .

In einer Kapillare führt der sich einstellende Randwinkel zu einer kugelförmig gekrümmten Oberfläche⁸. Bei benetzenden Flüssigkeiten befindet sich der Krümmungsmittelpunkt oberhalb der Flüssigkeitssäule, so dass der Druck (3) den Flüssigkeitsspiegel anhebt, bis dieser mit dem Schweredruck $p_s = \rho g h$ im Gleichgewicht steht. Dies ist bei $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ der Fall.

Bei vollständiger Benetzung ist der Randwinkel nahezu Null, der Krümmungsradius der Oberfläche r entspricht dem Radius R der Kapillare. Für Randwinkel $\theta > 0$ findet man den Zusammenhang $r = R/\cos\theta$, so dass

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g R} \quad (4)$$

für die kapillare Steighöhe gilt.

⁴bei Abwesenheit weiterer Kräfte Kugelflächen

⁵Neben den Kohäsionskräften können weitere Kräfte, wie die Gewichtskraft oder Fliehkräfte oder auch Adhäsionskräfte eine Rolle spielen.

⁶Andernfalls würden die frei beweglichen Flüssigkeitsmoleküle durch tangential wirkende Kraftanteile solange verschoben, bis dies der Fall ist.

⁷Die Kraft ist immer zum Krümmungsmittelpunkt gerichtet.

⁸Meniskus.

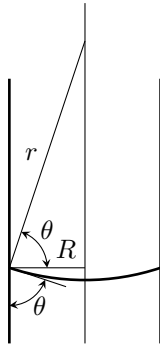


Abbildung 1: Randwinkel θ und Krümmungsradius r des Meniskus in einer Kapillare mit dem Radius R

Versuchsvorbereitung

- Grenzflächeneffekte, Oberflächenenergie, Oberflächenspannung, Kapillarität
- Adhäsion, Kohäsion, Benetzung, Randwinkel
- Überdruck in Tröpfchen, Schweredruck
- Tropfenmethode zur Messung der Oberflächenspannung

Aufgaben

- Bestimmen Sie mittels Wägevorgang die Oberflächenspannung verschiedener Flüssigkeiten!
- Berechnen Sie den zufälligen Fehler der Messung der Gewichtskraft für eine Flüssigkeit!

Ermitteln Sie den Fehler für die Oberflächenspannung der Flüssigkeit!

- Ermitteln Sie die Radien von verschiedenen Kapillaren durch die Bestimmung der Steighöhe einer vollständig benetzenden Flüssigkeit. Berechnen Sie den zufälligen Fehler der Steighöhe sowie den Fehler eines Kapillarradius!

Bestimmen Sie die benötigte Dichte der Flüssigkeit durch Messung von Volumen und Masse.