



Institut für Physikalische Chemie

Eine Hausarbeit zu der Vorlesung

Physikalische Grenzflächenchemie

## Mit dem Thema Oberflächenspannung



Verfasst von  
Martin Ciaston  
Enrico Pibiri

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Einleitung
  - 1.1 Historisches
2. Grundlagen
  - 2.1 Definition
  - 2.2 Thermodynamische Größen
    - 2.2.3 Young-Laplace-Gleichung
    - 2.2.4 Eötvössche Regel
  - 2.3 Herleitung der Gleichungen
3. Messmethoden
  - 3.1 Messmethoden bei Festkörpern
  - 3.2 Messmethoden bei Flüssigkeiten
    - 3.2.1 Du- Noüy- Ringmethode:
    - 3.2.2 Wilhelmy- Plättchenmethode
    - 3.2.3 Vergleich zwischen Ring- und Plättchenmethode
4. Anwendung
5. Zusammenfassung
6. Anhang
7. Literaturverzeichnis

# 1. Einleitung

Jeder hat sich sicher schon einmal gefragt warum ein Wasserläufer auf dem Wasser laufen kann oder warum man ein Glas Wasser höher füllen kann als den Rand. Viele haben sich sicherlich damit abgefunden, dass es einfach so ist wie es ist.

Diese Hausarbeit soll einen Einblick in die naturwissenschaftlichen Hintergründe dieser Thematik verschaffen.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Historisches

Die Oberflächenspannung als solches wurde erstmals von Niccolo Cabeo 1629 verwendet. Johann Andreas von Segner formulierte ihn dann klarer. Zur Theorie wurde 1805 von Thomas Young, 1806 von Pierre-Simon Laplace, 1830 von Poisson und 1842 bis 1868 von Josph Plateus wertvolles beigetragen.

### 2.2 Was ist Oberflächenspannung?

Die Oberflächenspannung entsteht durch attraktive Wechselwirkungen der Flüssigkeitsmoleküle die sich in der Regel gegenseitig anziehen. Wenn wir ein Molekül im inneren der Flüssigkeit betrachten erfährt es Wechselwirkungen mit allen benachbarten Molekülen. Dieses Molekül im innern hat die resultierende Kraft Null, es befindet sich im Gleichgewicht. Betrachten wir nun ein Molekül an der Oberfläche der Flüssigkeit. Hier fällt auf das ein Teil der Wechselwirkung mit anderen Molekülen fehlt. Natürlich findet eine Wechselwirkung mit der Gas- bzw. Dampfphase statt, doch diese sind in der Regel schwächer. Es folgt eine nach innen resultierende Kraft auf das Molekül welche Senkrecht zur Oberfläche gerichtet ist.

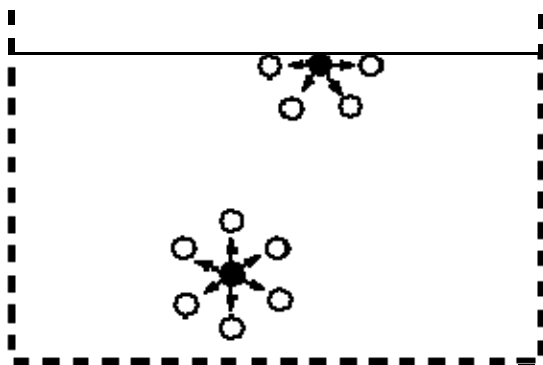


Abb. 1: Ein Molekül an der Oberfläche erfährt eine Kraft, die Senkrecht zur Oberfläche gerichtet ist

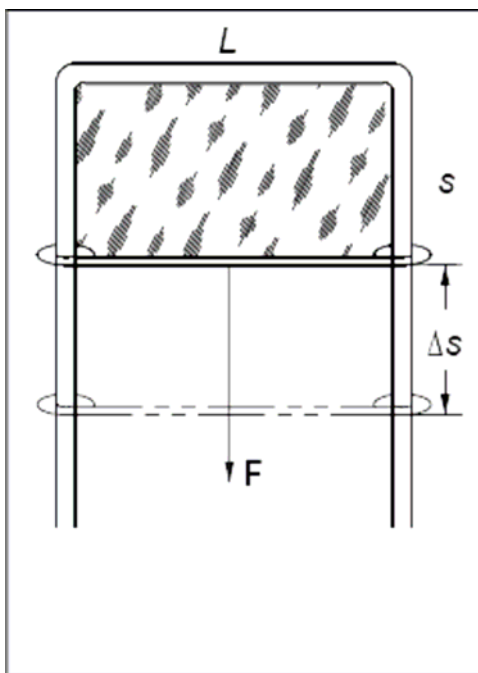
Die Energie, die nötig ist die Grenzschicht gegen die Kraft die nach innen gerichtet ist zu überwinden, wird als Oberflächenenergie oder Oberflächenspannung bezeichnet.

### 2.3 Thermodynamische Grundlagen

Die Arbeit, die notwendig ist, um die Oberfläche zu vergrößern geteilt durch die entstehende Fläche ergibt die daraus resultierende Oberflächenarbeit bzw. Oberflächenenergie.

$$(1) w = \frac{\Delta W}{\Delta A}$$

Der Koeffizient  $w$  wird als Oberflächenenergie oder Oberflächenenergiedichte bezeichnet (SI-Einheit  $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ).



**Abb.2:** Definition der Oberflächenspannung

In der Abb. 2 ist ein rechteckig geformter Drahtbügel mit den Kantenlängen  $L$  und  $s$  dargestellt. Zwischen diesen beiden Längen ist eine Flüssigkeitsoberfläche mit der Oberfläche  $2A = 2Ls$  gespannt. Zu beachten ist der Faktor 2 da die Oberfläche eine Vorder- und Rückseite besitzt. Wirkt nun eine Kraft  $F$  auf die Kantenlänge  $L$  des Drahtbügels so verschiebt sich die Flüssigkeitsoberfläche um  $\Delta s$  und die Oberfläche um  $\Delta A = 2L\Delta s$ . Die damit verbundene Arbeit beträgt somit:

$$(2) \Delta W = w\Delta A = w2L\Delta s = F\Delta s$$

Damit wird eine Oberflächenenergie definiert:

$$(3) \quad w = \frac{F}{2L}$$

Wird die Vektoreigenschaft von der Kraft  $F$  mit Berücksichtigt, ergibt sich die vektorielle Größe der Oberflächenspannung:

$$(4) \quad \sigma = \frac{F}{2L} \text{ mit der Einheit } [|\sigma|] = \text{N} \cdot \text{m}^{-1} = \text{J} \cdot \text{m}^{-2}$$

Da zur Oberflächenbildung geleistete Arbeit ist zur Volumenarbeit hinzu zu addieren wodurch ein Beitrag zur Freien Energie  $G$  geleistet wird:

$$(5) \quad dG = -SdT + Vdp + \sigma dA + \sum_j \mu_j + dn_j$$

Der Literaturwert für Wasser beträgt  $72 \text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$ . Zu Beachten ist die Unabhängigkeit von der Größe der Oberfläche. Die Oberflächenspannung ist für jede Molekülart und somit für jeden Stoff verschieden. Durch Zugabe von Oberflächenaktiven Substanzen kann die Spannung herabgesetzt werden (Bsp. Spülmittel).

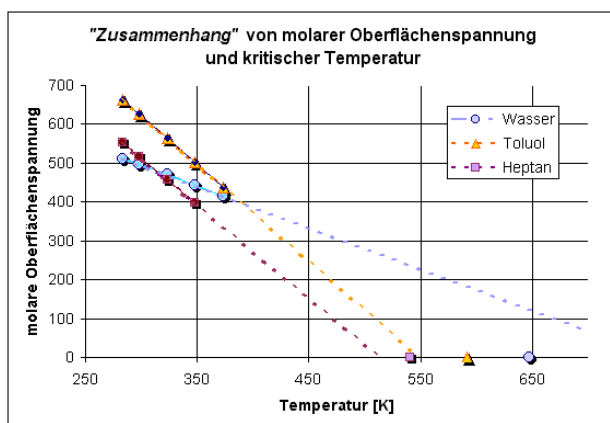
### 2.3 Die Eötvössche Regel

Diese Regel, nach dem ungarischen Physiker Loránd (Roland) Eötvös (1849-1919) benannt, erlaubt es die Oberflächenspannung eines flüssigen Reinstoffes bei jeder Temperatur vorherzusagen. Hierbei müssen die Molmasse, die Dichte und die kritische Temperatur bekannt sein. Am kritischen Punkt ist die Oberflächenspannung Null.

Eine Aussage der Regel ist:

1. Die Oberflächenspannung hängt linear von der Temperatur ab.

Wird die Oberflächenspannung gegen die Temperatur aufgetragen, so ergibt sich näherungsweise eine Gerade, die bei der kritischen Temperatur den Wert Null annimmt.



**Abb. 3:** Darstellung von 3 reinen Flüssigkeiten: Wasser, Toluol, Heptan.

### 2.3.1 Die Eötvös-Gleichung

Die Oberflächenspannung  $\sigma$  ist nach der einfachen Eötvös-Gleichung

$$(5) \sigma V^{2/3} = k(T_c - T)$$

Wobei  $V$  das molare Volumen und  $T_c$  die kritische Temperatur ist. Nach Eötvös ist  $k$  eine gültige Konstante für alle Flüssigkeiten. Die Eötvös-Konstante hat einen Wert von  $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ J/K} \cdot \text{mol}^{-2/3}$ .

Wird Berücksichtigt das die Gerade in der Regel schon 6K vor der kritischen Temperatur die Temperaturachse schneidet so wird aus (5):

$$(6) \sigma V^{2/3} = k(T_c - 6 - T)$$

Das molare Volumen ist gegeben durch die Molmasse und die Dichte:

$$(7) V = \frac{M}{\rho}$$

$\sigma V^{2/3}$  wird oft als molare Grenzflächenspannung  $\sigma_{\text{mol}}$  bezeichnet.

Mithilfe der Avogadrokonstanten, wird die ungünstige Einheit  $\text{mol}^{-2/3}$  vermieden:

$$(8) \sigma = k' \left( \frac{M}{\rho N_A} \right)^{-2/3} (T_c - 6K - T) = k' \left( \frac{N_a}{V} \right)^{2/3} (T_c - 6K - T)$$

Es wurde 1940 von John Lennard-Jones und Corner gezeigt, dass die Konstante  $k'$  ungefähr gleich der Boltzmannkonstante ist.

### 2.4 Die Young-Laplace-Gleichung

Die Young-Laplace-Gleichung beschreibt die Druckerhöhung in einem Flüssigkeitstropfen durch die Oberflächenspannung hervorgerufene Oberflächenkrümmung.

Es gilt in einer Flüssigkeitskugel:

$$(9) p = \frac{2\sigma}{r}$$

Wobei  $p$  der Druck und  $r$  den Kugelradius beschreibt.

Handelt es sich um eine beliebige gekrümmte Oberfläche, so wird aus (9):

$$(10) p = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$r_1$  und  $r_2$  beschreiben die Hauptkrümmungsradien.

Bsp.:

Druck im innern einer Seifenblase:

$$(11) p = \frac{4\sigma}{r}$$

Druck für kugelförmige Blasen und nicht kugelsymmetrische Körper:

$$(12) \quad p = 2\sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

Zu beachten ist wieder der Faktor 2, da die Seifenoberfläche zwei Oberflächen besitzt (Gasphase/Flüssigkeit).

### 2.4.1 Herleitung der Young-Laplace-Gleichung

Die Oberfläche der Kugel ist gegeben durch die Gleichung

$$(13) \quad A = 4\pi r^2$$

und das Volumen durch

$$(14) \quad V = \frac{4}{3}\pi r^3.$$

Bei einer Änderung des Radius um  $dr$  ergibt sich für die Änderung der Oberfläche

$$(15) \quad dA = 8\pi r dr$$

und für das Volumen

$$(16) \quad dV = 4\pi r^2 dr$$

Die geleistete Arbeit zur Veränderung der Oberfläche beträgt demnach:

$$(17) \quad dW = \sigma dA = \sigma 8\pi r dr$$

Die Volumenarbeit beträgt:

$$(18) \quad dW = p dV = p 4\pi r^2 dr$$

Setzt man Gleichung (17) und (18) gleich und löst nach  $p$  auf erhält man Gleichung (9).

## 3. Messmethoden: <sup>1) 2) 3) 4)</sup>

Es wird zwischen Messungen von Ober- und Grenzflächenflächenspannungen bei Feststoffen und von Flüssigkeiten unterschieden. Desweiteren wird sowohl bei Flüssigkeitsmessungen als auch bei Festkörpermessungen zwischen dynamischer Messung und statischer Messung unterteilt.

Bei dynamischer Messung tritt kein Kräftegleichgewicht ein bzw. es wird ständig neue Oberfläche geschaffen. Entgegengesetzt der dynamischen Messung wird bei der statischen Messung keine neue Oberfläche während der Messung gebildet und es tritt ein Kräftegleichgewicht ein. Diese Art der Messung eignet sich besonders für Präzisionsmessungen.

### 3.1 Messungen an Festkörpern:

- Liegende Tropfen- Methode: Sie dient zur Bestimmung des Benetzungsverhaltens an Festkörperoberflächen. Dieses geschieht durch optische Kontaktwinkelmessung. Für diese Bestimmung muss entweder die Flüssigkeit bekannt sein, oder die Festkörperoberfläche definiert sein.
- Dynamische- Wilhelmy- Methode: Der Fortschritt- und Rückzugswinkel werden bestimmt. Dies funktioniert an Festkörperoberflächen mit definierter Geometrie.
- Einzelfaser- Wilhelmy- Methode: Ebenso werden hier die Fortschritt- und Rückzugswinkel gemessen. Dieses Verfahren kann bei Einzelfasern wie z.B. Filz und Fasergewebe angewendet werden.
- Pulver- Kontaktwinkel- Methode: Bei Pulvern und anderen porösen Stoffen können bei diesem Verfahren die Kontaktwinkel und das Adsorptionsverhalten bestimmt werden. Es wird die Gewichtszunahme als Funktion der Zeit gemessen.

Sind die Kontaktwinkel bekannt kann nach der Young'schen Gleichung die Grenzflächenspannung berechnet werden:

$$(19) \quad \cos \Theta = \frac{\sigma_S - \sigma_{LS}}{\sigma_L}$$

mit:

$\sigma_L$ : Oberflächenspannung der Flüssigkeit [ mN/m]

$\sigma_S$ : freie Oberflächenenergie des ebenen Festkörpers [ mN/m]

$\sigma_{LS}$ : Grenzflächenenergie [ mN/m]

$\Theta$ : Kontaktwinkel

### 3.2 Messungen an Flüssigkeiten:

Ausser den wohl bekanntesten Methoden, der Wilhelmy- Plättchenmethode und der Du- Noüy- Ringmethode, gibt es noch weitere bewährte Messmethoden:

- Methode des hängenden Tropfens: Die Form des hängenden Tropfens ist genau durch die Erdbeschleunigung definiert. Zur Bestimmung der Oberflächenspannung muss die Geometrie des Tropfens gemessen werden oder anderweitig bekannt sein. Wichtig sind



hierbei der maximale Durchmesser und der Durchmesser des Tropfens in der Höhe der Mitte der Tropfenunterseite, sowie die Dichte der Flüssigkeit. Die Bestimmung erfolgt nach:

$$(20) \sigma = \rho \cdot g \cdot l / (1 / r_1 + 1 / r_2)$$

mit:  $\sigma$  = Oberflächenspannung [mN/m]

$\rho$  = Dichte der Flüssigkeit [1 g/cm<sup>3</sup>]

$g$  = Erdbeschleunigung [cm/s<sup>2</sup>]

$l$  = vertikale Tropfenlänge [m]

$r$  = Krümmungsradien des Tropfens an seiner größten Breite

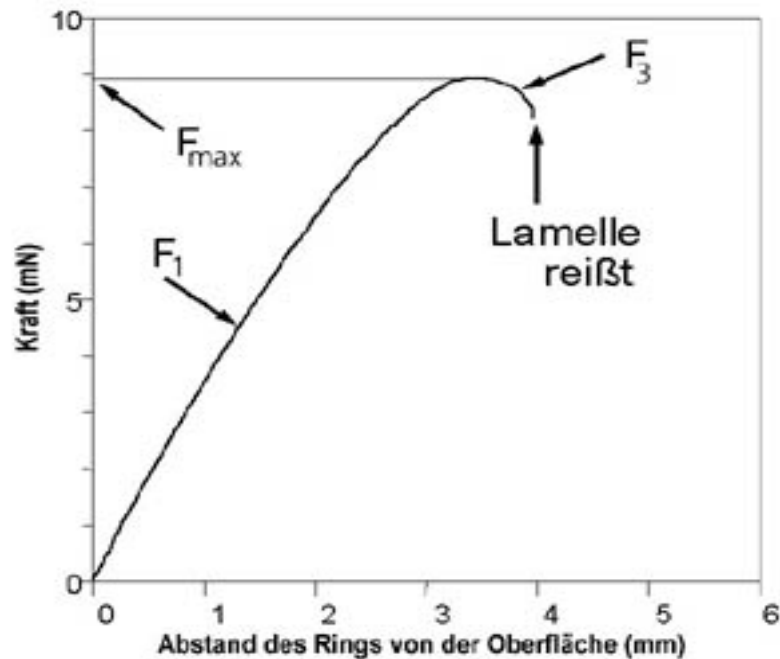
Hierbei kann auch bei extremen Temperaturen und Drücken gearbeitet werden.

- Blasendruck-Methode: Durch ein in eine Flüssigkeit getauchtes Röhrchen wird ein Gas in die Flüssigkeit geleitet. Die Druckschwankungen bei der Ablösung der entstehenden Bläschen werden gemessen. Die Oberflächenspannung vereint die Blasenbildungsgeschwindigkeit und den Gasdruck miteinander.

Die beiden bekanntesten Methoden werden im nachhinein beschrieben und anschließend verglichen.

### **3.2.1. Du- Noüy- Ringmethode:**

Zur Bestimmung mit dieser Methode wird ein Drahring mit bekannter Geometrie in eine Flüssigkeit getaucht. Beim Herausziehen des Ringes wird eine bestimmte Masse an Flüssigkeit mit hoch gezogen. Die Kraft welche aufgewendet werden muss um den Ring höher zu ziehen nimmt zu. Diese Kraft wird nach dem durchlaufen eines Maximums kurz vor dem abreißen des Ringes wieder geringer. Folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Kraft bei der Ringbewegung.



Gemessen wird hierbei die zum Abreißen des Ringes benötigte Kraft.

Die Oberflächenspannung ergibt sich nach:

$$(21) \quad \sigma_l = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot R} \cdot F = \frac{mg}{4 \cdot \pi \cdot R} \cdot F$$

mit:

$\sigma$  = Oberflächenspannung der Flüssigkeit [mN/m]

P = maximale Kraft beim Herausziehen des Ringes [N]

R = Radius des Ringes [cm]

m = Masse der hochgezogenen Flüssigkeit [g]

g = Erdbeschleunigung [cm/s<sup>2</sup>]

F = Korrekturfaktor [-]

Der so errechnete Wert ist nicht ganz korrekt und muss noch korrigiert werden.

Hierzu kann je nach Ringradius auf die Korrekturfaktoren von **William D. Harkins** und **Hubert F. Jordan** oder **Zuidema** und **Waters** bzw. **Fox** und **Chrisman** oder **Huh** und **Mason** zugegriffen werden. Diese Korrekturfaktoren sind bei der Messung Tabellenwerken zu entnehmen.

Es gibt auch die Variante bei welcher der Ring nicht soweit herausgezogen wird, sodass die Flüssigkeitslamelle reißt. Bei diesem Fall wird das Kraftmaximum zwei mal durchlaufen.

Abbildung (1a) zeigt diese Methode in einem animierten Bild zum besseren Verständnis.

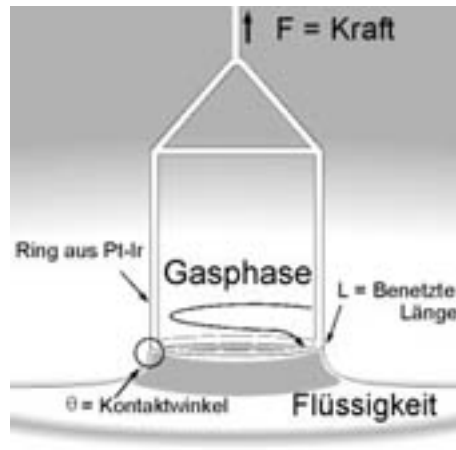


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Ringmethode.

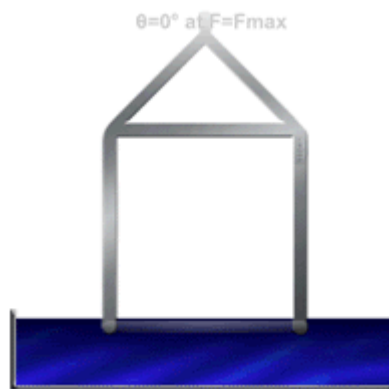


Abbildung 6: Animierte Darstellung der Ringmethode.

### 3.2.2: Wilhelmy- Plättchenmethode

Bei dieser Messmethode wird anstatt eines Ringes ein Plättchen mit bekannten Maßen benutzt. Dieses Plättchen besteht aus angerauhtem Platin und hat somit optimale Benetzungseigenschaften. Taucht das Plättchen in die Flüssigkeit ein so wird es benetzt. Auf das Plättchen wirkt nun eine Kraft, welche von der Benetzung herrührt. Diese Kraft kann gemessen werden und es steht ein Zugang zur Oberflächenspannung über die Formel (22) frei:

$$(22) \quad \sigma_l = \frac{P}{2(a+b)} = \frac{m \cdot g}{2(a+b)}$$

mit:  $\sigma_l$  = Oberflächenspannung der Flüssigkeit [mN/m]

P = gemessene Kraft [N]

$a, b$  = Länge und Breite der Platte;  $2(a+b)$ : benetzende Linie [cm]  
 $m$  = Masse der hochgezogenen Flüssigkeit [g]  
 $g$  = Erdbeschleunigung [ $\text{cm/s}^2$ ]

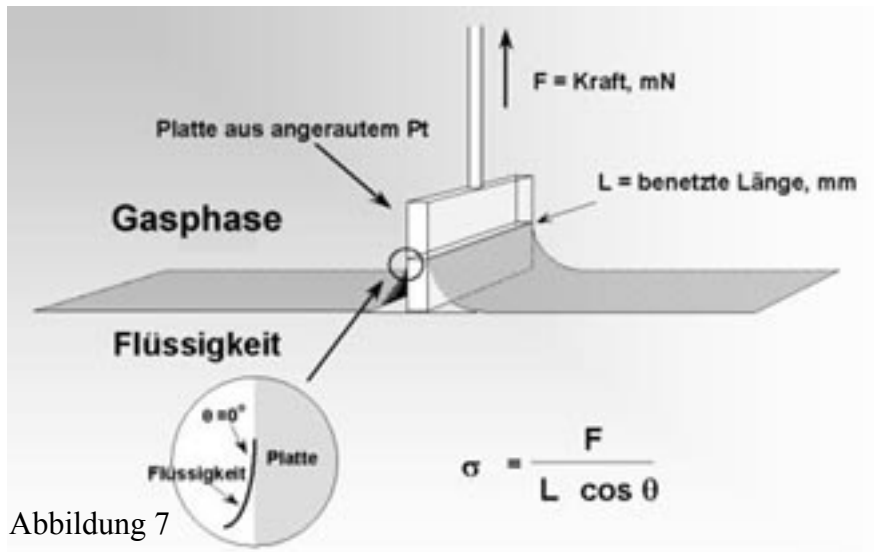


Abbildung 7

### 3.2.3 Vergleich zwischen Ring- und Plättchenmethode:

Vorteile der Ringmethode:

- ⊗ Da diese Methode historisch zuerst erfunden wurde, sind sehr viele Literaturwerte mit der Ringmethode gemessen worden. Dies ist bei Vergleichsmessungen zu beachten.
- ⊗ Bei sehr kleinen Grenzflächenspannungen ist diese Methode vorzuziehen da sie eine größere Genauigkeit aufweist. Dies kommt durch die drei mal größere Benetzung des Ringes.
- ⊗ Kationische Tenside und einige andere Flüssigkeiten weisen schlechte Benetzungseigenschaften an Platin auf. Bei der Ringmethode wird oft ein Draht aus Aluminium verwendet. Diese Flüssigkeiten können somit besser gemessen werden.

Vorteile der Plättchenmethode:

- ⊗ Die Plättchenmethode weist keine Notwendigkeit der Korrektur der Messwerte auf.
- ⊗ Die Dichte der Flüssigkeit muss nicht bekannt sein. Bei der Ringmethode ist dies der Fall.
- ⊗ Es tritt keine Phasendurchmischung ein, da die Phasenoberfläche nur berührt wird und nicht wie bei der Ringmethode in sie eingetaucht wird.
- ⊗ Durch das bewegen des Ringes bei der Messung, kann es zu Verfälschungen durch zu schnelles Bewegen des Ringes bzw. durch Flüssigkeiten mit hoher Viskosität kommen. Dadurch wird das Diffusionsgleichgewicht an der Grenzfläche möglicherweise nicht

erreicht. Die Plättchenmethode vermeidet diese Fehlerquellen, da das Plättchen während der Messung nicht bewegt wird.

#### 4. Anwendungen der Oberflächenspannung<sup>5)</sup>

Die Oberflächenspannung spielt eine große Rolle in vielen Industriellen sowie alltäglichen Prozessen. So ist die Herstellung von Tensiden welche die Oberflächenspannung möglichst schnell und effektiv auf ein Minimum bringen von großer Bedeutung. Diese Tensidlösungen können für viele Waschprozesse verwendet werden. Bei der Bildung von Schaum spielt die Oberflächenspannung eine große Rolle. So muss vor der Schaumbildung die Oberflächenspannung herab gesetzt werden damit Luftbläschen in die Flüssigkeit eingebracht werden können. Diese Luftbläschen steigen in der Flüssigkeit nach oben und es entstehen zwei Grenzschichten zwischen Luft und Flüssigkeit sowie Flüssigkeit und Luft mit angelagerten Tensiden. Folgende Abbildung zeigt dieses Verhalten.

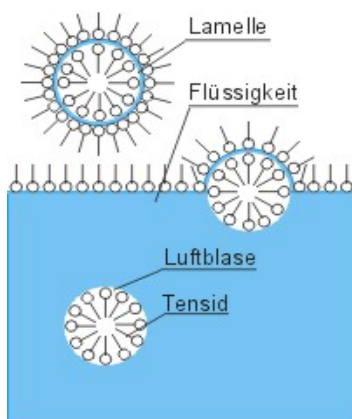


Abbildung 8: Waschprozess

Weiterhin ist bei der Herstellung von Tintenstrahldruckern die Oberflächenspannung ein wichtiges Thema. Auslaufverhalten und die Tröpfchengröße werden unter anderem mit der Oberflächenspannung kontrolliert. Sogar ein Wasserläufer kann nur auf dem Wasser laufen da ihn die Wasseroberfläche Einhalt gebietet.

## **5. Zusammenfassung**

Dieser kurze Einblick in die Thematik zeigt wie die Oberflächenspannung in unseren Alltag integriert ist. Sie beschreibt warum die Tropfen des Wassers wie Tropfen aussehen oder wie die Schaumbildung beim Waschprozess funktioniert. Die Oberflächenspannung ist die Ursache für viele selbstverständliche Prozesse. Alle Beispiele, Abbildungen und den beschriebenen Versuchen sollten für ein tieferes Verständnis beitragen.

## 6. Anhang (Versuche) <sup>6) 7)</sup>

### "Die Kraft der Seife"

Ein Ring, an dem eine Fadenschleife befestigt ist, wird in Seifenlösung getaucht und herausgezogen. In dem Ring bildet sich eine Seifenhaut. Da sich an der Fadenschleife innen und außen eine Seifenlamelle befindet, wirkt keine durch die Oberflächenspannung hervorgerufene Kraft auf die Schleife und sie hängt lose herunter.

Zersticht man die Seifenhaut im Inneren der Fadenschleife, so ist die Summe der durch die Oberflächenspannung hervorgerufenen Kräfte ungleich Null. Die Schleife wird auseinander gezogen, weil die Oberfläche der äußeren Seifenhaut dann minimal ist.



### 1. Starkes Wasser, schwacher Alkohol

Wer kennt dies nicht? Nach dem Essen ein Fläschchen Magenbitter für die Verdauung ist für manchen etwas Feines, und er fließt auch ohne Probleme aus dem Behältnis hinaus. Versucht man das gleiche jedoch mit Wasser stellt man fest, dass es zu Schwierigkeiten kommt: Die Flüssigkeit will nicht so recht.

Frage:

Wieso entleert sich das Original-Fläschchen problemlos, das mit Wasser gefüllte aber nicht?

So funktioniert es!

Damit sich ein solches Fläschchen vollständig entleeren kann, muss Flüssigkeit ausströmen und Luft einströmen. Bei Flaschen mit großer Öffnung kann man dann das "Gluckern" gut beobachten. Das Magenbitterfläschchen hat aber eine so schmale Öffnung, dass der Austausch nicht so ohne weiteres geht.

Nun kommt der Aspekt der Oberflächenspannung ins Spiel: Flüssigkeiten mit niedriger Oberflächenspannung laufen leicht heraus, solche mit hoher Oberflächenspannung nicht.

Die Oberflächenspannung bewirkt an der Flaschenöffnung eine Haut, die von der ausströmenden Flüssigkeit zu "durchbrechen" ist. Die Erdanziehungskraft "zieht" zwar an der Flüssigkeit, doch die Oberflächenspannung versucht, diese Haut stabil zu halten: Beim Wasser gelingt dies, bei dem Alkohol-Wasser-Gemisch (Magenbitter) jedoch nicht.

Der Trick mit dem Spülmittel!

Fügt man dem Wasser im Magenbitterfläschchen einige Tropfen Spülmittel hinzu, so wird die Oberflächenspannung reduziert, und das Wasser-Spülmittel-Gemisch kann auch aus der engen Öffnung ausfließen. Schon geringste Seifenmengen verringern die Oberflächenspannung des Wassers um bis zu 70%.

## 2. Bootsrennen mit Spannung

Als Rennboote dienen gewöhnliche Streichhölzer, die am hinteren Ende gespalten sind. Dort wird jeweils ein Stückchen Seife eingeklemmt: Fertig sind die Flitzer.

Frage:

Wie funktioniert der Seifenmotor?

So funktioniert es!

Der Antrieb für den Seifen-Motor wird durch den Wegfall der Oberflächenspannung des Wassers hervorgerufen. Taucht ein Boot (also unser präpariertes Streichholz) ins Wasser ein, wird es vom Wasser benetzt. Auch diese Moleküle erfahren aufgrund der Oberflächenspannung nur Kräfte, die nach unten gerichtet sind. Gleichzeitig "haften" sie aber auch am Boot und "ziehen" daran. Dies tun jedoch alle Wassermoleküle rund um das Streichholz. Und auch diese Kräfte ergeben insgesamt null, so dass sich ein Streichholz allein noch nicht bewegt. Das kleine Stück Seife bringt dieses Gleichgewicht aber durcheinander. Da sich die Seife nur am Ende der Boote befindet, wird auch zunächst nur dort die Oberflächenspannung reduziert. Dies führt dazu, dass die Wassermoleküle an der Rückseite des Bootes nicht mehr so stark ziehen können: Die vorne liegenden Wassermoleküle gewinnen die Oberhand. Es entsteht eine gerichtete Kraft nach vorne, und die Bötchen schippern voran.



Mit der Zeit verteilt sich die Seife im gesamten Wasser. Dann ist die Oberflächenspannung überall gleich stark, und es herrscht wieder ein Gleichgewicht aller am Boot ziehenden Kräfte: Das Rennen ist vorbei.

## 7. Literaturverzeichnis

Peter W. Atkins, Physikalische Chemie, Dritte korrigierte Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, 2001

Milan Johann Schwuger, Lehrbuch der Grenzflächenchemie, Georg Thieme Verlag Stuttgart  
New York, 1996

<http://de.wikipedia.org/wiki/Young-Laplace-Gleichung> , 26.06.2006

<http://iva.uni-ulm.de/PHYSIK/VORLESUNG/fluidemedien/node42.html>, 26.06.2006

<http://www.answers.com/topic/surface-tension>, 26.06.2006

Carl von Ossietzky, Anfängerpraktikum Grundkurs I

<http://www.physik.uni-oldenburg.de/Docs/holo/apr/pdf/Oberflaechenspannung.pdf>, 20.06.2006

[http://de.wikipedia.org/wiki/Eötvössche\\_Regel](http://de.wikipedia.org/wiki/Eötvössche_Regel), 20.06.2006

1) [http://www.unimeter.net/interim/4\\_OberflSpannung\\_A.htm](http://www.unimeter.net/interim/4_OberflSpannung_A.htm) , 19.06.2006

2) <http://www.kruss.de/> unter Theorie/Methoden, 28.06.2006

3) [http://de.wikipedia.org/wiki/Youngsche\\_Gleichung](http://de.wikipedia.org/wiki/Youngsche_Gleichung), 10.06.2006

4) <http://www.lkt.uni-erlangen.de/pdf/oberflaechenspannung.pdf>, 10.06.2006

5) <http://www.sita-messtechnik.de/schaum/index.html>, 10.06.2006

6) [http://www.sita-messtechnik.de/oberfl/frame\\_oberfl\\_experimente.html](http://www.sita-messtechnik.de/oberfl/frame_oberfl_experimente.html), 10.06.2006

7) <http://www.chemie-macht-spass.de/projekte/2003-phaenomen-wasser/01/01a.pdf>, 10.06.2006

