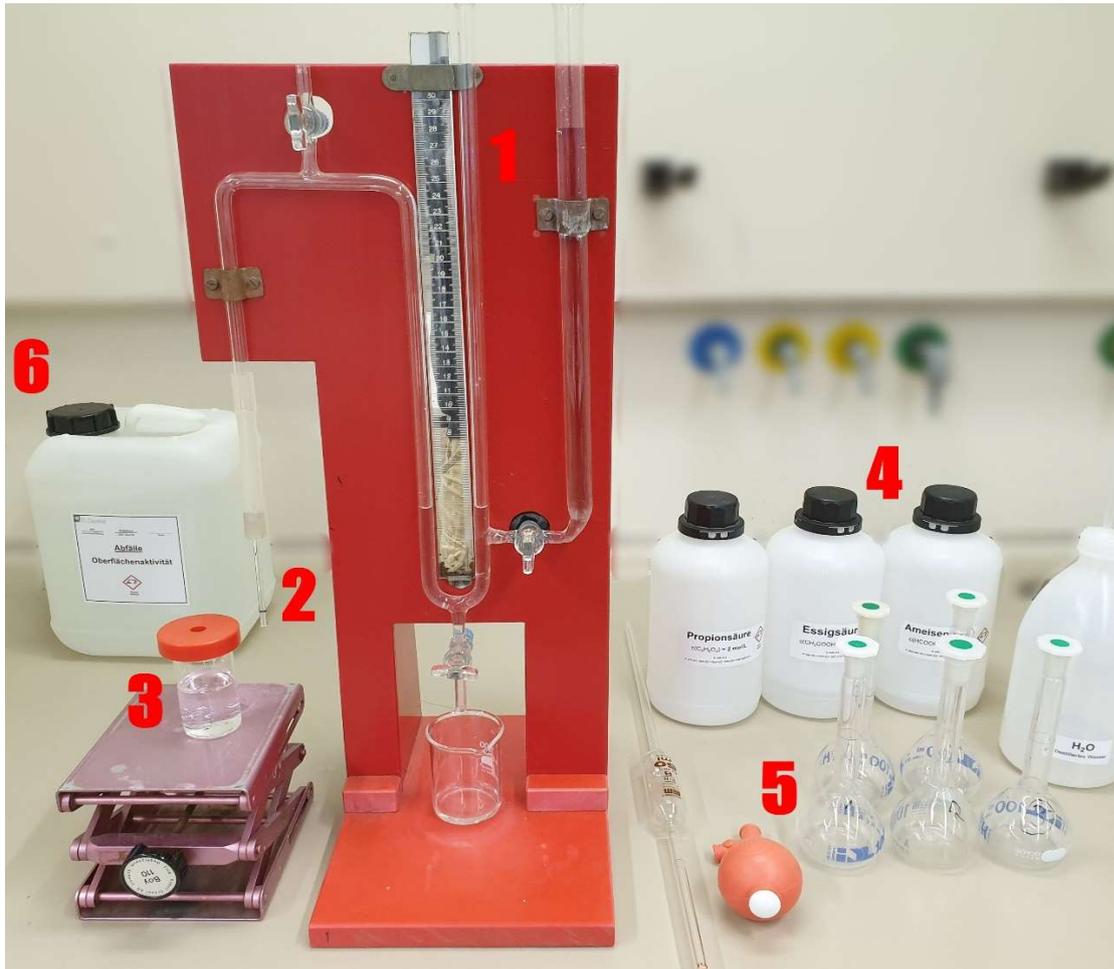


OBERFLÄCHENAKTIVITÄT



1. Versuchsplatz

- 01 – Messapparatur
- 02 - Kapillare
- 03 - Becherglas mit zu messender Lösung
- 04 - Verschiedene Säuren
- 05 - Messkolben, Bechergläser, Pipetten und Peleusball
- 06 - Abfallkanister

2. Allgemeines zum Versuch

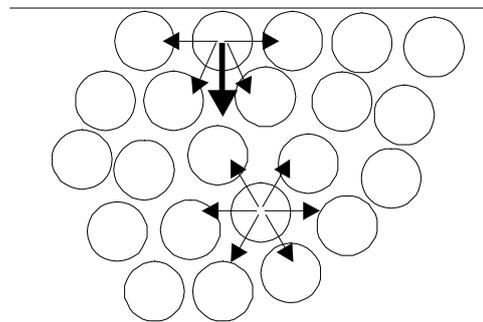
Für eine Reihe von Prozessen, die an der Grenzfläche zwischen zwei Phasen ablaufen (z. B. heterogene Katalyse, galvanische Abscheidung, Reibung, Adhäsion) und für die Beschreibung von Systemen, deren Eigenschaften überwiegend von ihren Oberflächen abhängen (Dispersionen, Mayonnaise, Schokolade, Bierschaum, Zigarettenqualm), ist es wichtig, die Verhältnisse an der Grenzfläche möglichst exakt zu beschreiben.

Eine der wichtigsten Grenzflächenphänomene ist die Grenzflächenspannung oder auch Grenzflächenenergie (warum darf man diese Bezeichnungen synonym verwenden?). Bezieht man sich

auf das System Flüssigkeit / (verdünntes) Gas, wird die Grenzflächenspannung der kondensierten Phase als **Oberflächenspannung** bezeichnet. Molekular gesehen besitzen die Teilchen an der Oberfläche eine andere Umgebung als diejenigen in der Volumenphase: sie sind nicht allseitig und im nahezu gleichen Abstand von Nachbarmolekülen umgeben. Ihnen kommt deswegen eine höhere potentielle Energie zu als den Teilchen im Inneren der Flüssigkeit (Abb.1). Daraus resultiert das Bestreben der Moleküle, von der Oberfläche weg in die Volumenphase zu gelangen, das heißt, die Größe der Oberfläche pro Volumen zu minimieren. Makroskopisch gesehen nimmt die Flüssigkeit (in Abwesenheit äußerer Kraftfelder) Kugelgestalt an.

Allgemein steigt die Oberflächenspannung mit zunehmender Stärke der intermolekularen Wechselwirkungen an. So weisen z.B. unpolare Substanzen eine geringere Oberflächenspannung auf als Substanzen mit starkem Dipolcharakter (Ausnahme: Quecksilber).

Abb. 1: Kraftlinien eines Teilchens im Inneren und an der Oberfläche einer Flüssigkeit (schematisiert)



Thermodynamisch gesehen lautet die Gibbssche Fundamentalgleichung für dG bezogen auf eine Volumenphase mit einer Phasengrenzfläche für ein Einkomponentensystem:

$$dG = -S dT + V dp + \sigma dA \quad (1)$$

mit σdA der „reversiblen Oberflächenarbeit“

Aufgelöst nach der Oberflächenspannung σ ergibt sich:

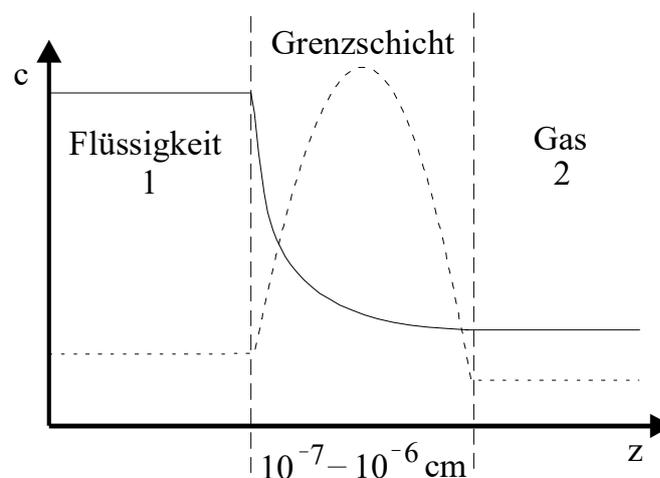
$$\sigma = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{T,p} \quad (2)$$

Die Dimension von σ ist also $[\sigma] = \text{J/m}^2 = \text{N/m}$ und entspricht der Energie, die aufgewendet werden muss, um eine neue Flächeneinheit zu erzeugen. In der Praxis wird oft Millijoule pro Quadratmeter (mJ m^{-2}) bzw. Millinewton pro Meter (mN m^{-1}) verwandt, um zahlenmäßig zu den gleichen Werten wie im cgs-System [erg/cm^2] zu kommen. Die Oberflächenspannung ist stark temperatur- und schwach druckabhängig. Sie sinkt mit steigender Temperatur, um schließlich bei $T_{\text{krit.}}$ ganz zu verschwinden. Für die Druckabhängigkeit existiert kein allgemeingültiger Zusammenhang. Die Maxwell - Beziehungen aus Gl. (1) lauten:

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right)_{p,A} = -\left(\frac{\partial S}{\partial A}\right)_{p,T} \quad \text{und} \quad \left(\frac{\partial \sigma}{\partial p}\right)_{T,A} = \left(\frac{\partial V}{\partial A}\right)_{p,T} \quad (3)$$

Betrachtet man Mehrstoffsysteme, so tritt als weitere Einflussgröße die Konzentration der gelösten Stoffe hinzu. Stoffe, die die Oberflächenspannung des Lösungsmittels verringern, werden als **oberflächenaktiv** bezeichnet. Tritt bereits bei geringen Konzentrationen eine starke Abnahme der Oberflächenspannung auf, so spricht man von **Tensiden** (auch „Detergentien“, engl. surfactant). Die Ursache dieses Effekts ist die Anreicherung der Moleküle in der Phasengrenzfläche (Abb. 2).

Abb. 2:
Konzentrationsprofil eines
Tensids (---) und des
Lösungsmittels (—)
an der Phasengrenze
flüssig / gasförmig



Bei der Formulierung des Zusammenhangs zwischen der Konzentration der oberflächenaktiven Substanz i und der Grenzflächenspannung spielt der Oberflächenexzess („surface excess“) Γ_i in Mol pro Quadratcentimeter (mol/cm^2) eine große Rolle.

Es ergibt sich insofern ein Problem, als klargestellt werden muss, wie mit der dritten Dimension umgegangen werden soll. (Die Bulk-Konzentration hat die Einheit mol/m^3 .) Weit verbreitet ist der Formalismus des „Gibbs dividing surface“. Die Bestimmung der Exzesskonzentration Γ_i ist nicht ganz einfach, weil die Grenzschicht sich räumlich über mehrere Moleküldurchmesser erstrecken kann. Gibbs ersetzte die dreidimensionale *Grenzschicht* (graue Fläche in Abb. 3b) durch eine zweidimensionale *Grenzfläche* in der Art, dass die Oberflächen-Exzesskonzentration des Lösungsmittels gleich Null ist ($\Gamma_1 \equiv 0$). Die Konzentrationen der beiden Komponenten werden bis zur Grenzfläche jeweils als konstant betrachtet. Diese Grenzfläche wird als „Gibbs-dividing-surface“ (GDS) bezeichnet.

Die graphische Ermittlung der Exzesskonzentration wird im Folgenden beschrieben. Man zeichnet zunächst das Dichteprofil des Lösungsmittels, $\rho(x)$, und legt eine Senkrechte $x = \text{const.}$ so durch das Dichteprofil, dass die Zwickel A_1 und A_2 gleich groß sind (siehe Abb. 3a). Dies ist das „Gibbs dividing surface“ bei $x = x_{\text{GDS}}$.

Anschließend wird über der gleichen Ortskoordinate x das Konzentrationsprofil $c(x)$ der gelösten Substanz eingetragen (Abb. 3b). Das Maximum sollte in der Nähe des GDS liegen. Schließlich

zeichnet man in der Phase α ($x < x_{GDS}$) ein Rechteck ein, das in der Höhe gerade der Bulk-Konzentration c_2^α entspricht und seine Begrenzung am Gibbs dividing surface findet. Ein zweites Rechteck trägt man in der Phase β ($x > x_{GDS}$) ein, das in der Höhe gerade der Lösungskonzentration c_2^β entspricht und seine Begrenzung ebenfalls am Gibbs dividing surface findet. Der Oberflächenexzess Γ_2 (dunkelgraue Fläche in Abb. 3c) ist dann das Integral über die Differenz zwischen dem Konzentrationsprofil und den Rechtecken.

Beachten Sie:

Der Oberflächenexzess des Lösungsmittels Γ_1 ist in dieser Konstruktion identisch 0. (Das ist der tiefere Sinn der Konstruktion).

Abb. 3a: Dichteprofil
(Konzentrationsprofil
des Lösungsmittels)

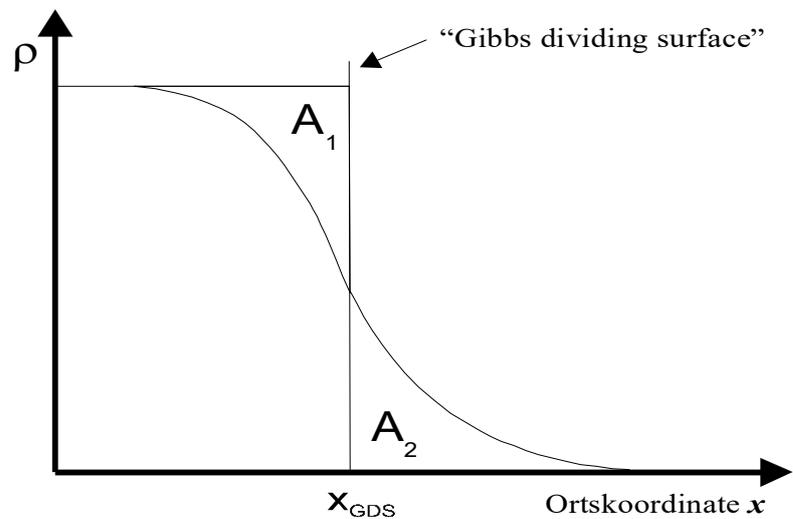


Abb. 3b Konzentrationsprofil
der gelösten Substanz

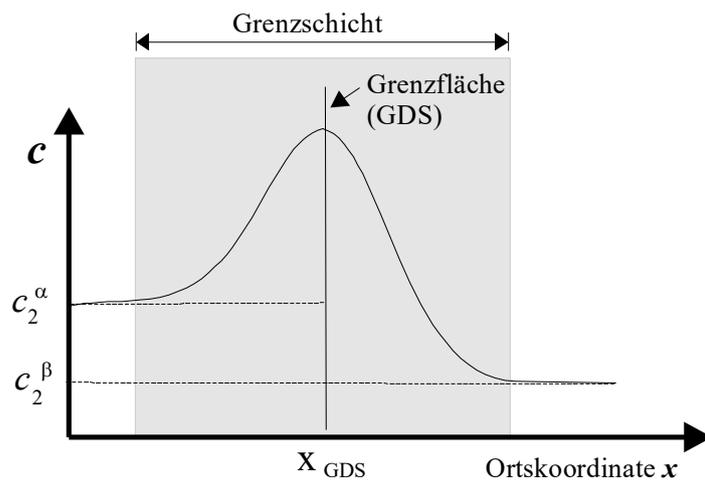
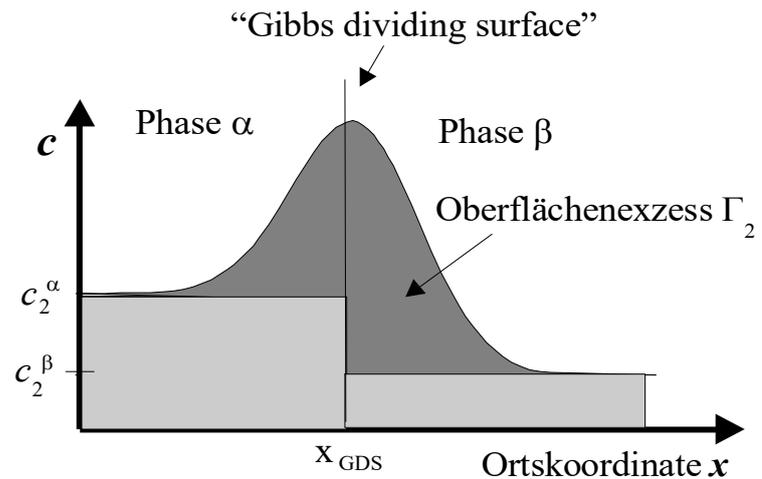


Abb. 3c Oberflächenexzess
der gelösten Substanz



Bei der folgenden thermodynamischen Betrachtung halten wir die Entropie S , die Temperatur T , den Druck p und das Volumen V konstant.

Wir schreiben

$$dG = \sum_i \mu_i d(A \cdot \Gamma_i) + \sigma dA \quad (4)$$

Die Größe in Klammern könnte man auch als n_i bezeichnen. Wir halten nun μ_i und σ fest und integrieren über A und n_i :

$$G = A \sum_i \mu_i \Gamma_i + \sigma A \quad (5)$$

Nun bilden wir das totale Differential

$$dG = A \sum_i (\mu_i d\Gamma_i + \Gamma_i d\mu_i) + \sigma dA + A d\sigma \quad (6)$$

Vergleich mit Relation (4) ergibt

$$0 = A \sum_i \Gamma_i d\mu_i + A d\sigma \quad (7)$$

Wir betrachten nun ein 2-Komponenten-System (Lösungsmittel und oberflächenaktive Substanz). Auflösen von (7) nach $d\sigma$ ergibt

$$d\sigma = -\Gamma_1 d\mu_1 - \Gamma_2 d\mu_2 \quad (8)$$

Nun zeigt sich, warum die „Gibbs dividing surface“ so gelegt wurde; wir haben $\Gamma_1 \equiv 0$ und

$$d\sigma = -\Gamma_2 d\mu_2 = -\Gamma_2 d\mu_2 \quad (9)$$

Wir schreiben

$$\mu_2 = \mu_2^0 + RT \ln a_2 \quad (10)$$

mit μ_2^0 dem chemischen Potential im Referenzzustand. Weiterhin nehmen wir in der üblichen (in der Praxis oft nicht anwendbaren) Weise eine verdünnte Lösung an und setzen die Aktivität a_2 gleich der Konzentration c_2 .

Dann gilt

$$d\mu_2 = RT d \ln c_2 \quad (11)$$

und

$$\Gamma_2 = -\frac{1}{RT} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \ln c_2} \right)_T \quad (12)$$

Dies ist die **Gibbssche Adsorptionsgleichung**. Sie ist von fundamentaler Bedeutung für die physikalische Chemie der Grenzflächen. Sie besagt, dass sich bevorzugt solche Stoffe an der Wasseroberfläche anlagern, die die Oberflächenspannung senken.

Einen quantitativen Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung und Konzentration liefert die von *Szyszkowski* ursprünglich (1908) empirisch gefundene Formel:

$$\Delta\sigma = (\sigma_0 - \sigma) = a \ln(1 + bc_2) \quad (13)$$

σ_0 : Oberflächenspannung des reinen Lösungsmittels

a, b : Konstanten

Gl. (13) lässt sich aber auch herleiten, wenn man für Γ_2 in Gl. (12) einen Ausdruck analog der *Langmuirschen* Adsorptionsisotherme einsetzt (vergl. Versuch „**ADSORPTIONSISOTHERME**“):

$$\Gamma_2 = \Gamma_{\max} \frac{c_2}{B + c_2} \quad (14)$$

mit Γ_{\max} als den maximal möglichen Oberflächenexzess der Komponente 2. (Man nimmt hier an, dass die Grenzfläche etwa eine Monolage dick ist. Sonst wäre die *Langmuir*-Isotherme nicht anwendbar).

Man erhält zunächst:

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \ln c_2} \right)_T = -RT\Gamma_{\max} \frac{c_2}{B + c_2} \quad (15a)$$

Der Parameter b aus der *Langmuir*-Isotherme ist der Quotient einer Desorptionsrate und einer Adsorptionsrate. Er hat die Dimension einer reziproken Konzentration.

Wir formen um:

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial c_2} \right)_T c_2 = -RT\Gamma_{\max} \frac{c_2}{B + c_2} \quad (15b)$$

$$\begin{aligned} \sigma_0 - \sigma &= - \int_{\sigma(c_2'=0)}^{\sigma(c_2'=c_2)} d\sigma = RT\Gamma_{\max} \int_0^{c_2} \frac{1}{B + c_2'} \cdot dc_2' \\ &= RT\Gamma_{\max} \left[\ln(B + c_2') \right]_0^{c_2} \\ &= RT\Gamma_{\max} \ln \frac{B + c_2}{B} = RT\Gamma_{\max} \ln \left(1 + \frac{c_2}{B} \right) \end{aligned}$$

$$\sigma - \sigma_0 = -RT\Gamma_{\max} \ln(1 + bc_2)$$

Dies liefert dann die **Szyszkowski - Gleichung** (13) mit $a = RT\Gamma_{\max}$

Für $c_2 \rightarrow 0$ folgt mit der Beziehung $\ln(1+x) \approx x$ für $x \rightarrow 0$:

$$\Delta\sigma = (\sigma_0 - \sigma) = abc_2 \quad (16)$$

Die Größe b heißt **spezifische Kapillaraktivität**, sie wird umso größer, je stärker ein Stoff in der Grenzfläche adsorbiert wird und ist somit ein Parameter für die chemische Individualität der jeweiligen Substanzen.

Mithilfe von Gl. (16) lässt sich die von *Traube* experimentell gefundene Regel, wonach in einer homologen Reihe von oberflächenaktiven Substanzen (z. B. Fettsäuren, Alkohole) man nur jeweils 1/3 der Konzentration des vorhergehenden Glieds der Reihe (mit einer CH₂-Gruppe weniger) benötigt, um dieselbe Abnahme der Oberflächenspannung zu erzielen, quantifizieren. Mit diesen Bedingungen, also $\Delta\sigma_n = \Delta\sigma_{n+1}$ und $c_{n+1} = 1/3c_n$, folgt

$$b_{n+1} = 3b_n \quad (17)$$

unter der Voraussetzung, dass a sich nicht bzw. nur geringfügig ändert.

Eine Deutung (nach Langmuir) der Traubeschen Regel besagt, dass die Arbeit, die aufzuwenden ist, um eine bestimmte Menge einer oberflächenaktiven Substanz aus der Grenzfläche in die flüssige Volumenphase zu bringen, in einer homologen Reihe um einen konstanten Betrag pro CH_2 -Gruppe größer wird.

Um dies einzusetzen, benutzen wir den Quotienten zwischen Desorptions- und Adsorptionsrate, der einem *Boltzmann*-Faktor proportional ist:

$$b = \frac{1}{B} = \frac{k_A}{k_D} \propto \left[\exp\left(\frac{-\Delta\varepsilon}{kT}\right) \right]^{-1} = \exp\left(\frac{\Delta\varepsilon}{kT}\right) \quad (18)$$

mit $\Delta\varepsilon$ der für die Desorption aufzubringenden Energie. Wir schreiben $b = nb_0$ mit n der Anzahl der CH_2 -Gruppen und erhalten:

$$3 = \frac{b_{n+1}}{b_n} = \frac{\exp((n+1)b_0/kT)}{\exp(nb_0/kT)} = \exp(b_0/kT)$$

oder auch

$$b_0 = kT \cdot \ln 3 \quad (19)$$

Die Ursache der Oberflächenaktivität liegt in der molekularen Struktur der Stoffe begründet. Tenside sind **amphiphile** Substanzen, d.h. sie bestehen sowohl aus **lyophilen** („lösungsmittelfreundlichen“) als auch aus **lyophoben** („lösungsmittelfeindlichen“) Gruppen. Handelt es sich bei dem Lösungsmittel um Wasser, so spricht man von **hydrophilen** bzw. **hydrophoben** Gruppen. Nützlich für die Beschreibung einfacher Tenside ist das (stark schematisierte) Kopf - Schwanz - Modell. Hierbei steht der Kopf für die polare (= hydrophile) Gruppe, die zum Wasser hin orientiert ist, während der Schwanz für den unpolaren (= hydrophoben) Rest (meist Kohlenwasserstoff- oder Perfluorkohlenwasserstoffreste) steht, der aus dem Wasser herausragt (vergl. Abb. 4).

Eine Unterteilung der (wasserlöslichen) Tenside erfolgt zweckmäßigerweise nach der Art der Kopfgruppe, man unterscheidet ionische (genauer: an- und kationische), zwitterionische und nichtionische Tenside. Zu den anionischen Tensiden zählen die auch als Seifen bekannten Alkalisalze der Fettsäuren sowie die aliphatischen und araliphatischen Sulfonate und Phosphate. In der Anwendung stellen die anionischen Tenside (und hierbei insbesondere die Sulfonate) die wichtigste Gruppe dar, sie kommen vor allem in Wasch- und Reinigungsmitteln zum Einsatz. Kationische Tenside, deren wichtigste Verbindungsklasse von den auch als Invertseifen bezeichneten quartären Ammoniumverbindungen gebildet wird, finden bei einer Vielzahl von Prozessen Anwendung, z. B. als Flotationshilfsmittel, als Korrosionsinhibitoren und auch als Phasen - Transfer - Katalysatoren. Die zwitterionischen Tenside, hierbei besonders die Betaine (abgeleitet von Betain = Trimethylammoniumacetat) werden wegen ihrer Eigenschaften (Hautverträglichkeit, Unempfindlichkeit gegenüber pH-Wert und Härte des Wassers) vor allem in

Körperpflegemitteln eingesetzt. Zu den nichtionischen Tensiden gehören z.B. Blockcopolymere, die aus mindestens zwei Polymerblöcken unterschiedlicher chemischer Natur aufgebaut sind und deshalb amphiphile Eigenschaften besitzen.

Eine charakteristische Größe für jedes Tensidsystem ist die **kritische Mizellbildungskonzentration** „critical micelle concentration“ (*cmc*). Während in einer stark verdünnten Lösung die Tensidteilchen molekulardispers vorliegen und überwiegend in der Oberfläche adsorbiert werden, steigt mit zunehmender Konzentration des Tensids die Grenzflächenkonzentration bis zur praktisch vollständigen Belegung der Oberfläche an. Da nun keine weiteren Teilchen mehr in die Oberfläche eingebaut werden können, lagern sich die Moleküle im Inneren der Flüssigkeit zu dynamischen Aggregaten, den sogenannten Mizellen, zusammen (siehe Abb. 4).

Beim Erreichen der *cmc* verliert die Gibbssche Adsorptionsisotherme ihre Gültigkeit, da weitere Konzentrationserhöhungen des Tensids keinen Einfluss mehr auf die Oberflächenspannung des Systems hat.

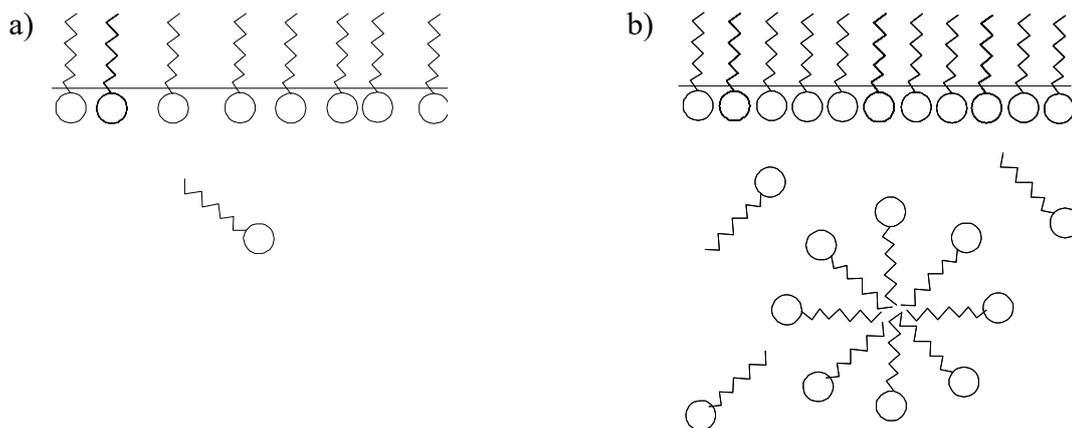


Abb. 4:

Verhältnisse in einer verdünnten (a) und einer konzentrierten (b) Tensidlösung (schematisch)

Zur Messung von Ober- bzw. Grenzflächenspannungen stehen eine Reihe von Verfahren zur Verfügung. Die genauesten bauen auf einer detaillierten Tropfenanalyse auf.

3. Orientieren Sie sich über

- Verhältnisse an Phasengrenzen, Oberflächen
- Oberflächenspannung, Oberflächenaktivität
- Messung der Oberflächenspannung
- Laplace - Gleichung
- Tenside, Tensidwirkung
- Kolloide

4. Literatur

- P. W. Atkins: Physikalische Chemie
1. Auflage VCH Weinheim 1988 Kap. 7.6., 25.4.
- G. Wedler: Lehrbuch der Physikalischen Chemie
1. Auflage VCH Weinheim 1982 Kap. 2.7.
- Försterling / Kuhn: Praxis der Physikalischen Chemie
3. Auflage VCH Weinheim 1991 Kap. 1.9., 5.1., 5.3.
- G. Brezesinski / H.-J. Mögel: Grenzflächen und Kolloide
1. Auflage Spektrum Verlag Heidelberg 1993

5. Aufgabe

Die Oberflächenspannung unterschiedlich konzentrierter Lösungen von Ameisen-, Essig- bzw. Propionsäure ist zu bestimmen. Aus der Differenz zur Oberflächenspannung von reinem Wasser sind die Konstanten a und b aus der *Szyszkowski* - Gleichung zu ermitteln und anhand des Vergleichs der gefundenen Werte für b die Gültigkeit der Traubeschen Regel zu überprüfen. Außerdem ist Γ_{\max} zu berechnen.

6. Versuchsdurchführung

Die Oberflächenspannung ist mittels der **Blasendruckmethode** (s. Abb. 5) zu bestimmen. Bei dieser Messmethode lässt man Blasen aus einer Kapillare durch die zu untersuchende Flüssigkeit perlen. Der Überdruck im Manometergefäß entspricht im Moment der Ablösung einer Blase dem Kapillardruck. Unter der Voraussetzung vollständiger Benetzung ergibt sich dann für die Oberflächenspannung aus dem Energieerhaltungssatz

$$\sigma = \frac{rg}{2}(h_2\rho_2 - h_1\rho_1) \quad (20)$$

mit

- g : Erdbeschleunigung
- ρ_1 : Dichte der Untersuchungssubstanz
- ρ_2 : Dichte der Manometersubstanz
- R : Kapillarradius

Gleichung (20) ist eine Konsequenz der *Laplace* Gleichung. Sie wird im Anhang hergeleitet. Zwischen den beiden Seiten einer gekrümmten Flüssigkeitsoberfläche herrscht die Druckdifferenz

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} \quad (21)$$

mit r dem Krümmungsradius. Sie wird im Anhang hergeleitet.

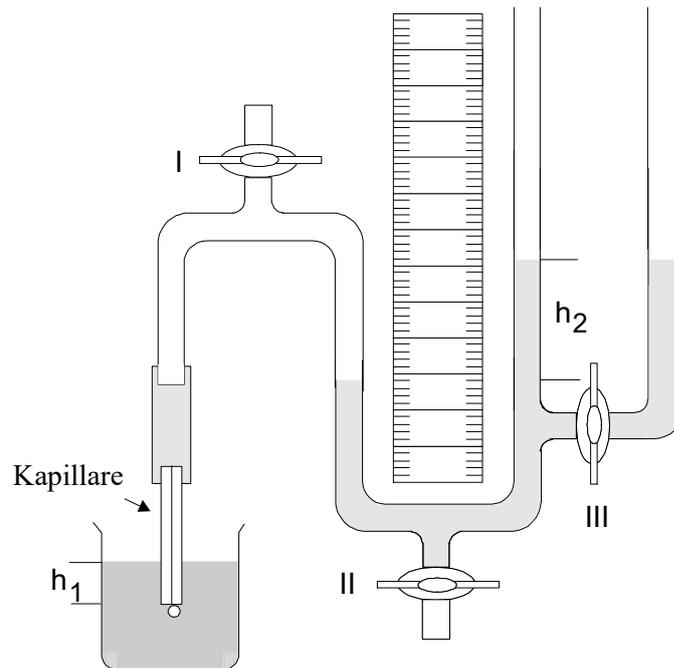


Abb. 5: Messanordnung zur Bestimmung der Oberflächenspannung nach der Blasendruckmethode

Für die eigentlichen Messungen wird nach dem Befüllen des Versuchsgerätes mit Wasser (alle 3 Hähne geschlossen) zunächst Hahn III kurz geöffnet um einen Vordruck aufzubauen (damit sich kein Wasser in die Kapillare saugen kann). Erst jetzt wird die Kapillare in die Flüssigkeit **1 cm tief** (h_1) eingetaucht. Anschließend lässt man durch Öffnen von Hahn III soviel Wasser in das Manometergefäß übertreten, bis sich 2-3 Blasen ablöst haben. Hahn III wird geschlossen und es wird gewartet bis sich keine weiteren Blasen mehr ablösen. Nun wird h_2 abgelesen. Diese Messung ist für **jede** Säurekonzentration **6-mal** (2x3), für Wasser **8-mal** (2x4) durchzuführen.

Man beginnt mit der Bestimmung der Oberflächenspannung von Wasser und misst anschließend jeweils 5 unterschiedlich konzentrierte wässrige Lösungen von Ameisen-, Essig- und Propionsäure; hierbei geht man von 9 n Ameisensäure, 3 n Essigsäure und 2 n Propionsäure aus, die nach den Messungen jeweils auf die Hälfte zu verdünnen sind. Für die Dichte ρ_2 der Untersuchungssubstanz kann hierbei in guter Näherung von einem Wert von 1 g/ml ausgegangen werden.

7. Auswertung

Die Konstanten a und b aus der Szyszkowski-Gleichung lassen sich direkt durch Anpassung der Parameter in Gl. (13) durch nicht-lineare Regression (z. B. mit dem „Solver“ von Excel) bestimmen. Dazu berechnet man für die vermessenen Konzentrationen zunächst die Änderung der Oberflächenspannung $\Delta\sigma$ mit angenommenen Werten für die Parameter a und b . Zu jeder Konzentration berechnet man die quadratische Differenz zwischen berechnetem Wert und Messwert. Die Summe dieser Fehlerquadrate ist ein Maß für die Qualität der Anpassung der Gleichung an die Messwerte. Mithilfe verschiedener Iterationsverfahren kann man durch Variation der Parameter a und b die Fehlerquadratsumme minimieren. Der „Solver“ von Excel erledigt dies automatisch. Wichtig ist dabei, dass man mit ungefähr passenden Startwerten beginnt und die Toleranz des Ergebnisses hinreichend klein wählt.

- Bestimmen Sie die Werte von a und b der Szyszkowski-Gleichung mittels nichtlinearer Regression. Eine Anleitung zur nichtlinearen Regression mit dem „Solver“ von Excel wird durch den Versuchsassistenten gegeben.
- Vergleichen Sie die erhaltenen Werte von b gemäß Gl. (16) miteinander und diskutieren Sie eventuelle Abweichungen von der Traubeschen Regel.
- Überprüfen Sie außerdem die Gültigkeit der Traubeschen Regel anhand des Vergleichs der entsprechenden Messwerte.
- Berechnen Sie schließlich aus den Steigungen der Geraden Γ_{\max} .

8. H- und P-Sätze der verwendeten Chemikalien

Essigsäure:



H290	Kann gegenüber Metallen korrosiv sein
H314	Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden
P260	Nebel/Dampf nicht einatmen.
P280	Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen.
P303+P361+P353	BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT (oder dem Haar): Alle kontaminierten Kleidungsstücke sofort ausziehen. Haut mit Wasser abwaschen [oder duschen].
P305+P351+P338	BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiterspülen.
P310	Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM/Arzt anrufen.

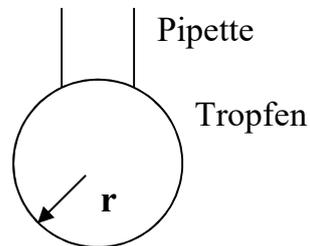
Ameisensäure:



H290	Kann gegenüber Metallen korrosiv sein
H302+H332	Gesundheitsschädlich bei Verschlucken oder Einatmen
H314	Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.
P261	Einatmen von Nebel/Dampf vermeiden.
P280	Schutzhandschuhe/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen.
P303+P361+P353	BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT (oder dem Haar): Alle kontaminierten Kleidungsstücke sofort ausziehen. Haut mit Wasser abwaschen [oder duschen].
P305+P351+P338	BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiterspülen.
P310	Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM/Arzt anrufen.
EUH071	Wirkt ätzend auf die Atemwege.

Propionsäure:

H226	Flüssigkeit und Dampf entzündbar
H314	Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden
H335	Kann die Atemwege reizen
P210	Von offener Flamme und heißen Oberflächen fernhalten. Nicht rauchen.
P260	Nebel/Dampf nicht einatmen.
P280	Schutzhandschuhe/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen.
P302+P352	BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT: Mit viel Wasser waschen.
P305+P351+P338	BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiterspülen.
P310	Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM/Arzt anrufen.

9. Anhang**Herleitung der Laplace Gleichung**

Wir betrachten die Arbeit, die geleistet werden muss, um den Tropfen infinitesimal zu vergrößern. Dabei wird die Schwerkraft vernachlässigt.

Es gilt:

$$dW = \Delta p dV = \sigma dA \quad (\text{A1})$$

$$\begin{aligned} 0 &= \left(\frac{\partial G}{\partial r} \right)_{p,T} = -\Delta p \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{p,T} + \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial r} \right)_{p,T} \\ &= -\Delta p \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{4\pi}{3} r^3 \right) \right)_{p,T} + \sigma \left(\frac{\partial}{\partial r} (4\pi r^2) \right)_{p,T} \\ &= -\Delta p (4\pi r^2) + \sigma (8\pi r) \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

$$dA = d(4\pi r^2) = 8\pi r dr \quad (\text{A3})$$

Einsetzen der Gleichung. (A2) und (A3) in Gleichung (A1) ergibt:

$$\Delta p 4\pi r^2 dr = \sigma 8\pi r dr \quad (\text{A4})$$

und

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} \quad (\text{A5})$$