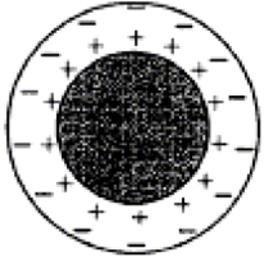
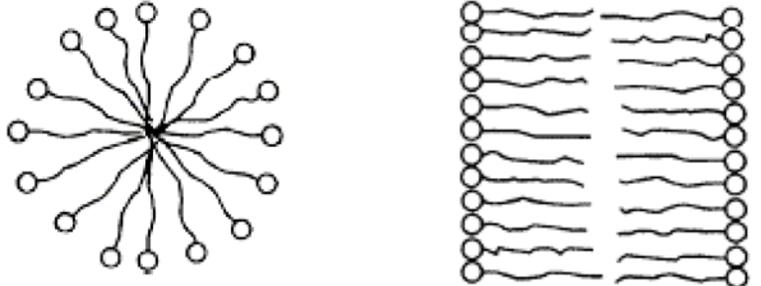




**Kolloide** - zu griechisch kólla 'Leim' - sind Teilchen in einer Suspension, die groß genug sind, um keine Quanteneigenschaften mehr aufzuweisen, aber klein genug, damit ihre Bewegung von der Thermodynamik dominiert wird. Typischerweise haben sie einen Radius von etwa 0.1 - 10 Mikrometer. Kolloide können fest, flüssig oder gasförmig in einem anderen Stoff (dem Dispersionsmittel) verteilt sein, zum Beispiel in Seifenlaugen und Lacken.

<http://www.wikipedia.org/wiki/kolloide> (12. Juni 2006)

Medium	Teilchen	Name	Beispiele und Anwendungen
Flüssig	Fest	Suspension / Sol	Flußwasser, Tinte, Farbe
Flüssig	Flüssig	Emulsion	Milch (teilweise), Emulsionspolymersierung
Flüssig	Gas	Schaum	Flotation, Bier, Mousse au chocolat
Fest	Fest	Feste Suspension	Knochen, Verbundwerkstoffe
Fest	Flüssig	-	Öllagerstätten, Opale, Perlen
Fest	Gas	Fester Schaum	Bimsstein
Gas	Fest	Aerosol	Rauch, Pollen
Gas	Flüssig	Aerosol	Dampf, Wolken, Haarspray
Gas	Gas	-	Keine Kolloide!

Dispersionskolloide	Molekülkolloide	Mizellen- bzw. Assoziationskolloide
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrophobe Kolloide</li> <li>• thermodynamisch instabil</li> <li>• polydispers und polyform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrophile Kolloide</li> <li>• thermodynamisch stabil</li> <li>• Makromoleküle / Polymere (<math>\sim 10^9</math> Atome)</li> <li>• geknäult, polydispers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrophile Systeme</li> <li>• thermodynamisch stabil</li> <li>• Assoziat von Tensidmolekülen</li> <li>• Selbstorganisation</li> <li>• Unterschiedlich in Gestalt und Größe (Gestalt, Ladungszustand und Konzentration des Tensids, Polarität und Elektrolytgehalt des Dispersionsmittels, Temperatur)</li> </ul>

(Einteilung nach Staudinger)

## 1. Ficksches Gesetz:

(... bei zeitunabhängigen Konzentrationsgradienten)

$$j_i = -D \nabla c_i = -D \frac{d}{dx} c_i$$

Diffusions- bzw. Teilchenstrom  $j_i$

Diffusionskoeffizient  $D$   
(in  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )

Konzentration  $c_i$

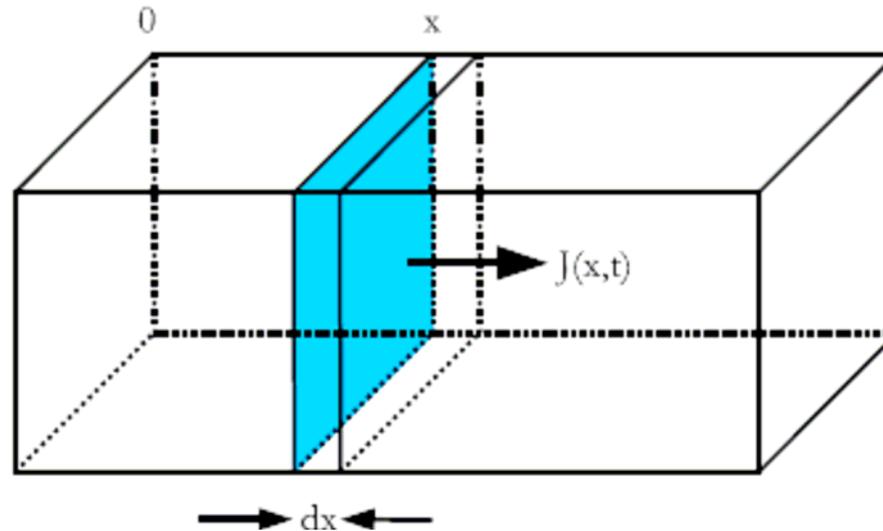
Einsteinbeziehung:  $D = kT f_R$

Reibungskoeffizient  $f_R$ :  $F_R = (f_R)^{-1}$  u  
mit  $f_R = (6\pi\eta r)^{-1}$  für kugelförmige  
Teilchen (Stokes-Reibung)

## 2. Ficksches Gesetz:

(... bei zeitabhängigen Konzentrationsgradienten)

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D \Delta c_i = D \nabla^2 c_i = D \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) c_i$$



$$\begin{aligned} \frac{\partial c_i}{\partial t} &= \frac{j_i(x,t)A}{A\partial x} - \frac{j_i(x+\partial x,t)A}{A\partial x} \\ &= \frac{1}{\partial x} \left[ -D \left( \frac{\partial c_i(x,t)}{\partial x} \right)_x + D \left( \frac{\partial c_i(x,t)}{\partial x} \right)_{x+\partial x} \right] \\ &= \frac{D}{\partial x} \left[ -\frac{\partial c_i}{\partial x} + \frac{\partial c_i}{\partial x} + \partial x \left( \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \right)_x \right] = D \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \end{aligned}$$



Sedimentationsgeschwindigkeiten für Kolloide ergeben sich aus dem Gleichgewicht von Gravitationskraft und (Stokes-) Reibungskraft:

$$F_G = mg = \frac{4\pi}{3} r^3 (\rho_1 - \rho_2) g = 6\pi\eta r u = F_R \quad \longrightarrow \quad u = \frac{2r^2 (\rho_1 - \rho_2) g}{9\eta}$$

In dieser Näherung wurde nicht berücksichtigt:

- (i) die gegenseitige Beeinflussung der Kolloidteilchen,
- (ii) eine Polydispersität,
- (iii) eine Abweichung von der Kugelgestalt,
- (iv) die Diffusion und
- (v) der Transport von elektrischen Ladungen.

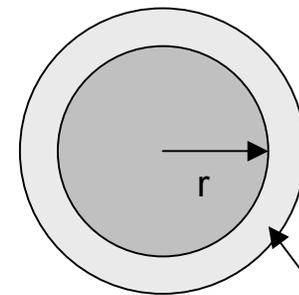
**Elektrophorese** bezeichnet die Wanderung elektrisch geladener Teilchen durch einen als Trägermaterial dienenden Stoff in einem elektrischen Feld.

$$F_{el} = qE = 4\pi r^2 \rho_\sigma E = 6\pi\eta r u = F_R \quad \longrightarrow \quad u = \frac{qE}{6\pi\eta r} = \frac{2r\rho_\sigma E}{3\eta} = \mu_{el} E$$

$\rho_\sigma$  Oberflächenladungsdichte

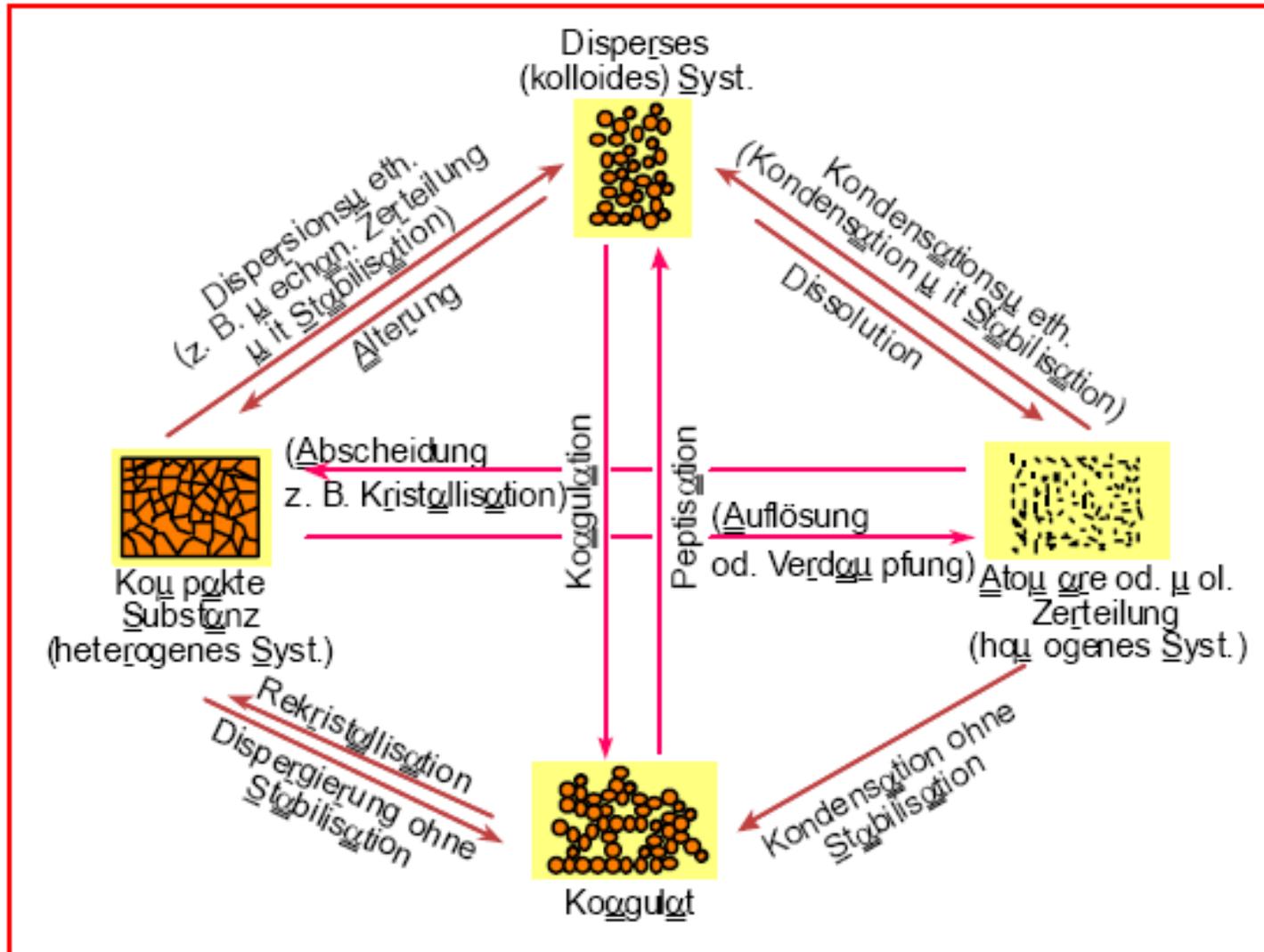
Nach einer Theorie von Hückel:

$$u = \frac{2\varepsilon\zeta E}{3\eta} f(r/\lambda_D) \approx \frac{2\varepsilon\zeta E}{3\eta} \left( 1 + \frac{r}{\lambda_D} \right)$$



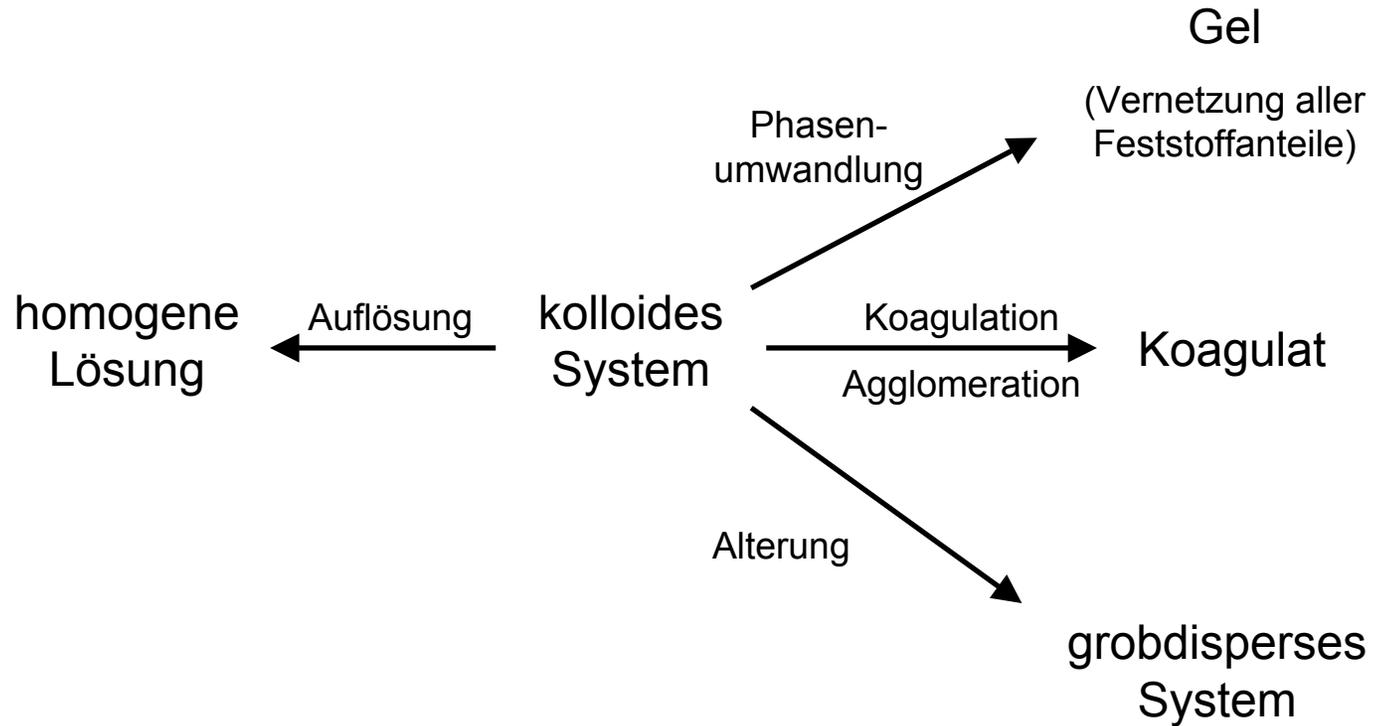
elektrochem.  
Doppelschicht  
mit einer  
Schichtdicke  $\lambda_D$

Das **Zetapotential** (auch  $\zeta$ -Potential) ist das elektrische Potential an der Abscherschicht eines bewegten Partikels in Suspension.





# Stabilität von Solen (kolloiden Lösungen)





# Kinetik der Koagulation

Kinetischer Prozess zweiter Ordnung:

$$-\frac{dn_1}{dt} = k_{11}n_1^2$$

$$-\frac{dn_1}{dt} = k_{12}n_1n_2$$

$$-\frac{dn_1}{dt} = k_{1j}n_1n_j$$

mit  $k_{ij} = k_0 e^{-E^*/kT}$

und  $k_0 = \frac{8kT}{3\eta} = 16\pi rD$

$n$  = Anzahl der Kolloides zur Zeit  $t$   
 $k_{ij}$  = Geschwindigkeitskonstanten  
 $k$  = Boltzmannkonstante  
 $\eta$  = Viskosity  
 $r$  = Kolloidradius  
 $T$  = Temperatur  
 $E^*$  = Aktivierungsenergie

und dem Diffusionkoeffizient  $D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$  (Einstein-Beziehung)

→  $n_1(t) = \sum n_i = \frac{n^0}{1 + \frac{t}{t_{1/2}}}$        $-t_{1/2} = kn^0 / 2$

Für Diffusion-kontrollierte Koagulation (schnelle Koagulation) mit  $E^* \approx 0$  gilt:

$$k_{ij} = k_0$$



# Schulze-Hardy-Regel

Empirische Ermittlung der kritischen Koagulationskonzentration (ccc) in Abhängigkeit der Elektrolytkonzentration und -wertigkeit durch Schulze und Hardy Ende des 19. Jhd.:

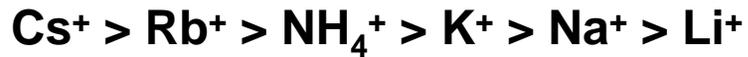
- Mit zunehmender Elektrolytkonzentration kommt es zur Koagulation der kolloiden Lösung.
- Die kritische Koagulationskonzentration verhält sich bei ein- zwei- und dreiwertigen Gegenionen etwa wie 1 : 50 : 1000 ( $ccc \sim 1/z^6$ ).

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Sol		Au-Sol		As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -Sol	
Elektrolyt	ccc in mmol/L	Elektrolyt	ccc in mmol/L	Elektrolyt	ccc in mmol/L
NaCl	9,3	NaCl	24	NaCl	51
KCl	9,0	KNO <sub>3</sub>	25	KCl	50
KBr	12,5	[K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ]/2	23	KNO <sub>3</sub>	50
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,2	CaCl <sub>2</sub>	0,4	MgCl <sub>2</sub>	0,7
MgSO <sub>4</sub>	0,2	BaCl <sub>2</sub>	0,4	MgSO <sub>4</sub>	0,8
Tl <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,2	[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ]/2	0,009	CaCl <sub>2</sub>	0,7
				AlCl <sub>3</sub>	0,093
				[Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ]/2	0,096



# Hofmeisterregel

Koagulierende Wirkung der einwertigen Kationen auf negative Sole:



Koagulierende Wirkung der einwertigen Anionen auf positive Sole:

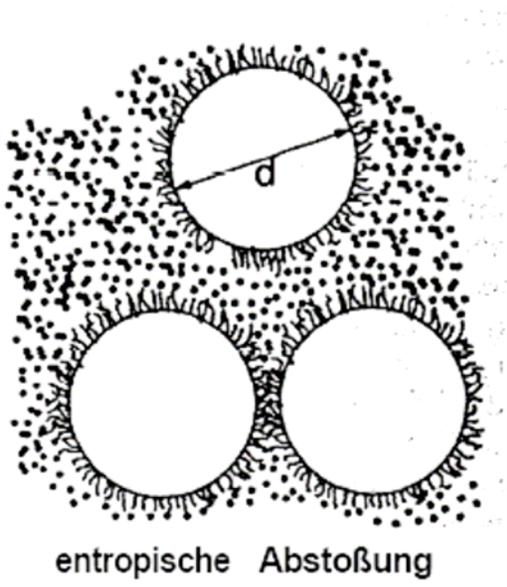


## Sterische Stabilisierung

Kolloide sind mit einer Polymerschicht überzogen.

Überlapp führt zu einer entropischen Abstoßung (Verkleinerung des Konfigurationsraums der Polymere).

Gleichgewicht zwischen van-der-Waals-Kräfte und entropischer Abstoßung.

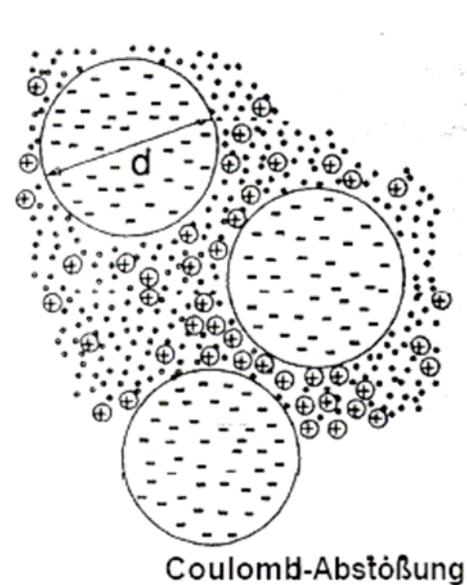


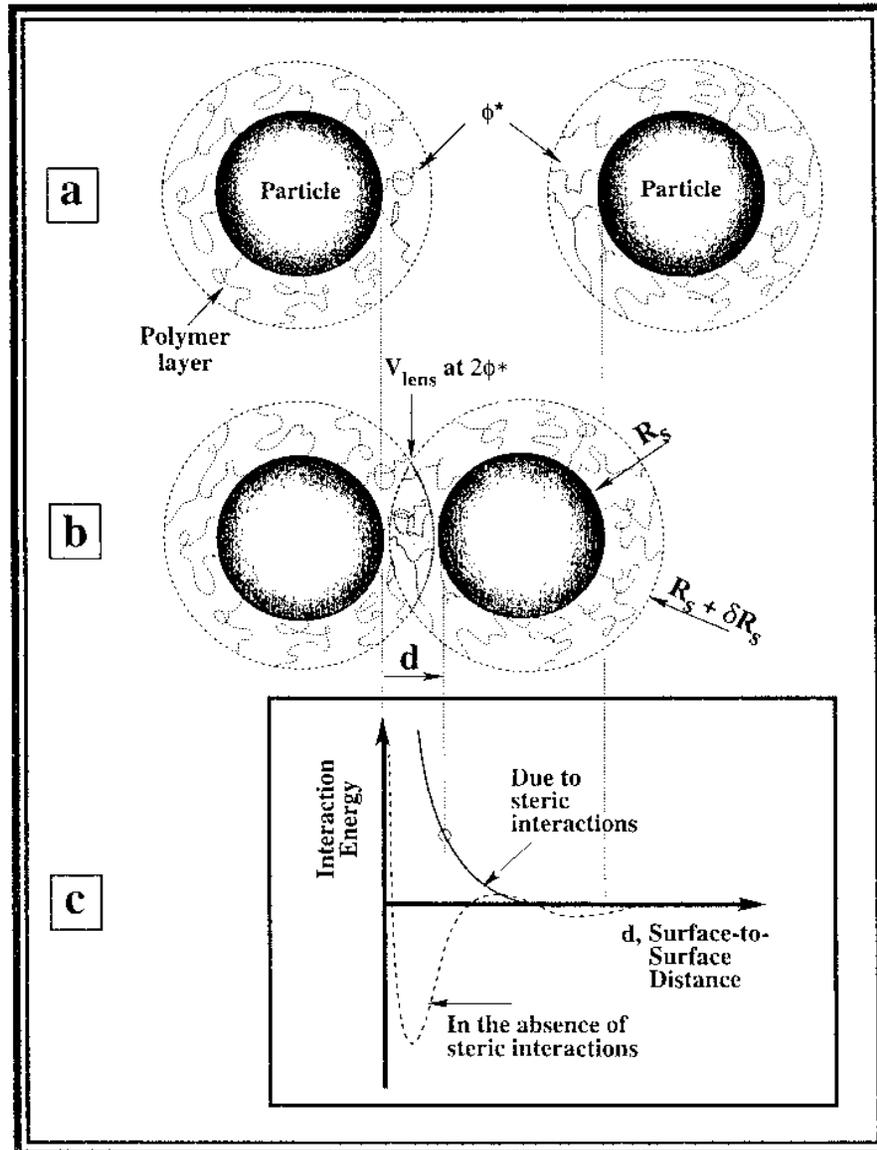
## Ladungsstabilisierung

Kolloide adsorbieren Ionen und bilden geladene Makroionen mit 100-10000 Elementarladungen.

Bildung einer elektrochemischen Doppelschicht (EDL) mit thermisch diffus verteilten Gegenionen im Lösungsmittel.

Gleichgewicht zwischen van-der-Waals-Kräfte und elektrostatischer Abstoßung.







**TABLE 13.2** Electrostatic and Steric Stabilization: A Comparison

---

Electrostatic stabilization

---

Addition of electrolytes causes coagulation.

Usually effective in aqueous systems.

More effective at low concentrations of the dispersion.

Coagulation is not always possible.

Freezing of the dispersion induces irreversible coagulation.

---

Steric stabilization

---

Insensitive to electrolytes in the case of non-ionic polymers.

Equally effective for both aqueous and non-aqueous dispersions.

Effective at both low and high concentrations.

Reversible coagulation is more common.

Good freeze-thaw stability.

---

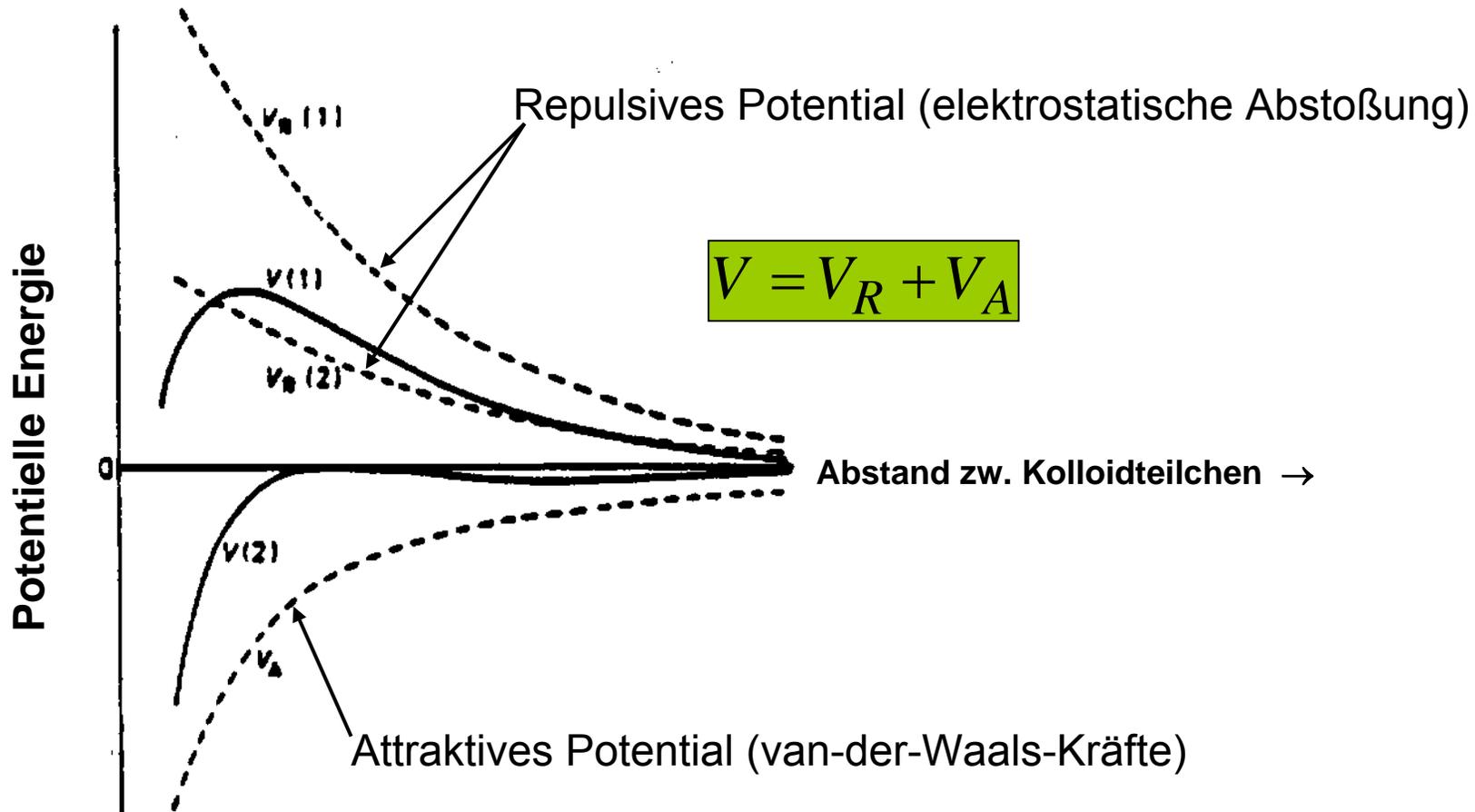
*Source:* Hunter, 1987.



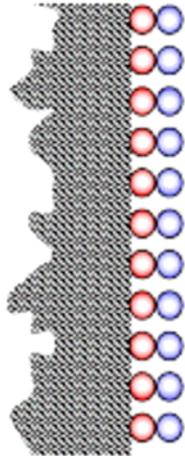
# DLVO-Theorie

DLVO: Derjaguin, Landau, Verwey, Oberbeek  
(1941, 1948)

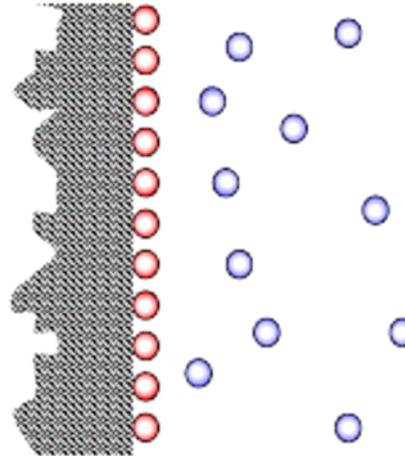
Grenzflächenchemie  
SS 2006  
Dr. R. Tuckermann



Oberfläche in  
Kontakt mit Luft

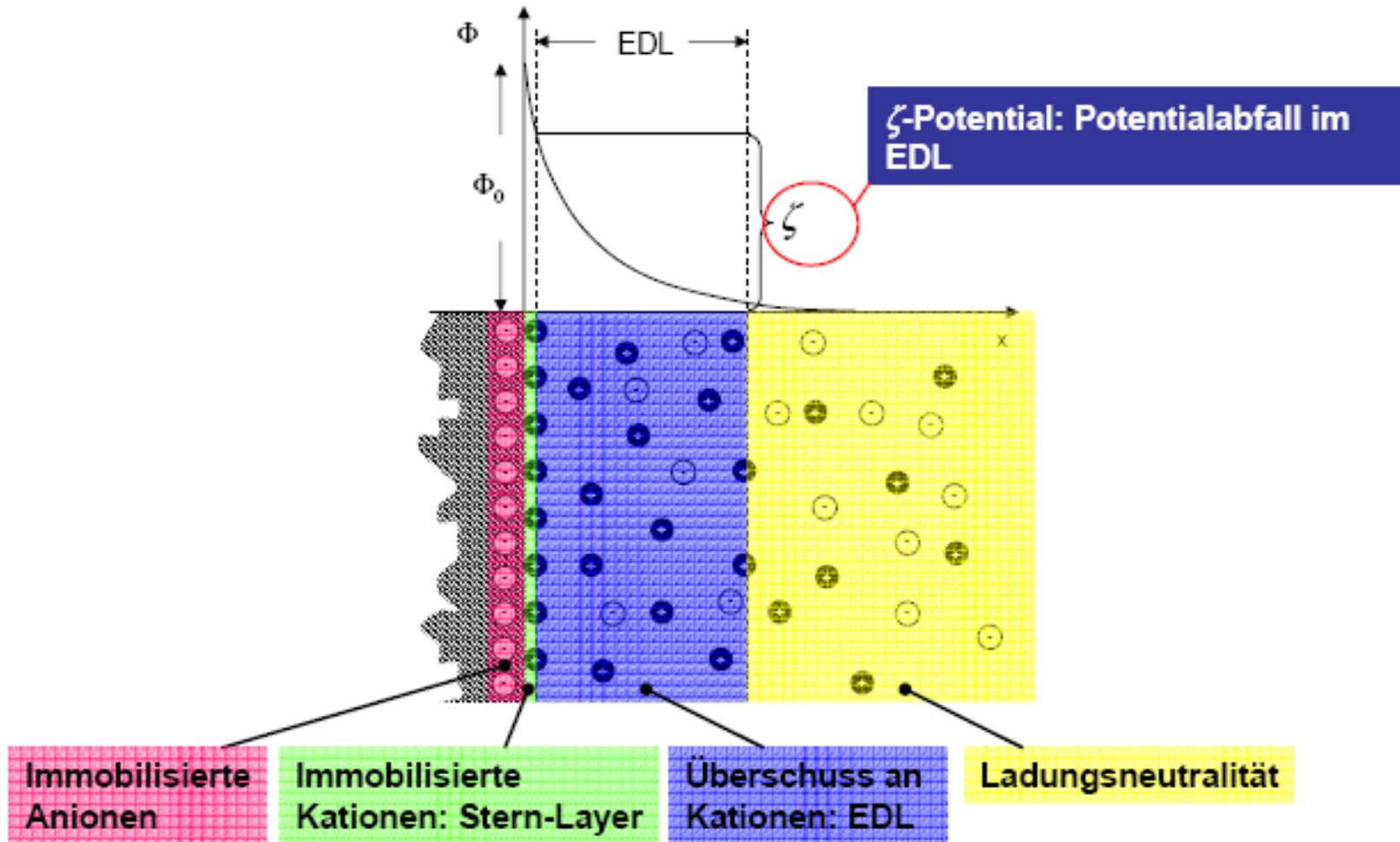


Oberfläche in Kontakt  
mit Flüssigkeit



Dissoziation von  
Oberflächengruppen  
oder Anlagerung von  
Ionen aus der  
Flüssigphase

- **Bildung einer Oberflächenladungsdichte, falls Moleküle geladen**
- **Gegenladungen diffus in der Flüssigkeit verteilt (Debye-Schicht)**





## Maxwell-Gleichungen

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= \frac{\rho_q}{\varepsilon} & \operatorname{div} H &= 0 \\ \operatorname{rot} E &= -\frac{\partial B}{\partial t} & \operatorname{rot} H &= J + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned}$$

Elektrisches Feld und Potential  $E = -\nabla\Phi$

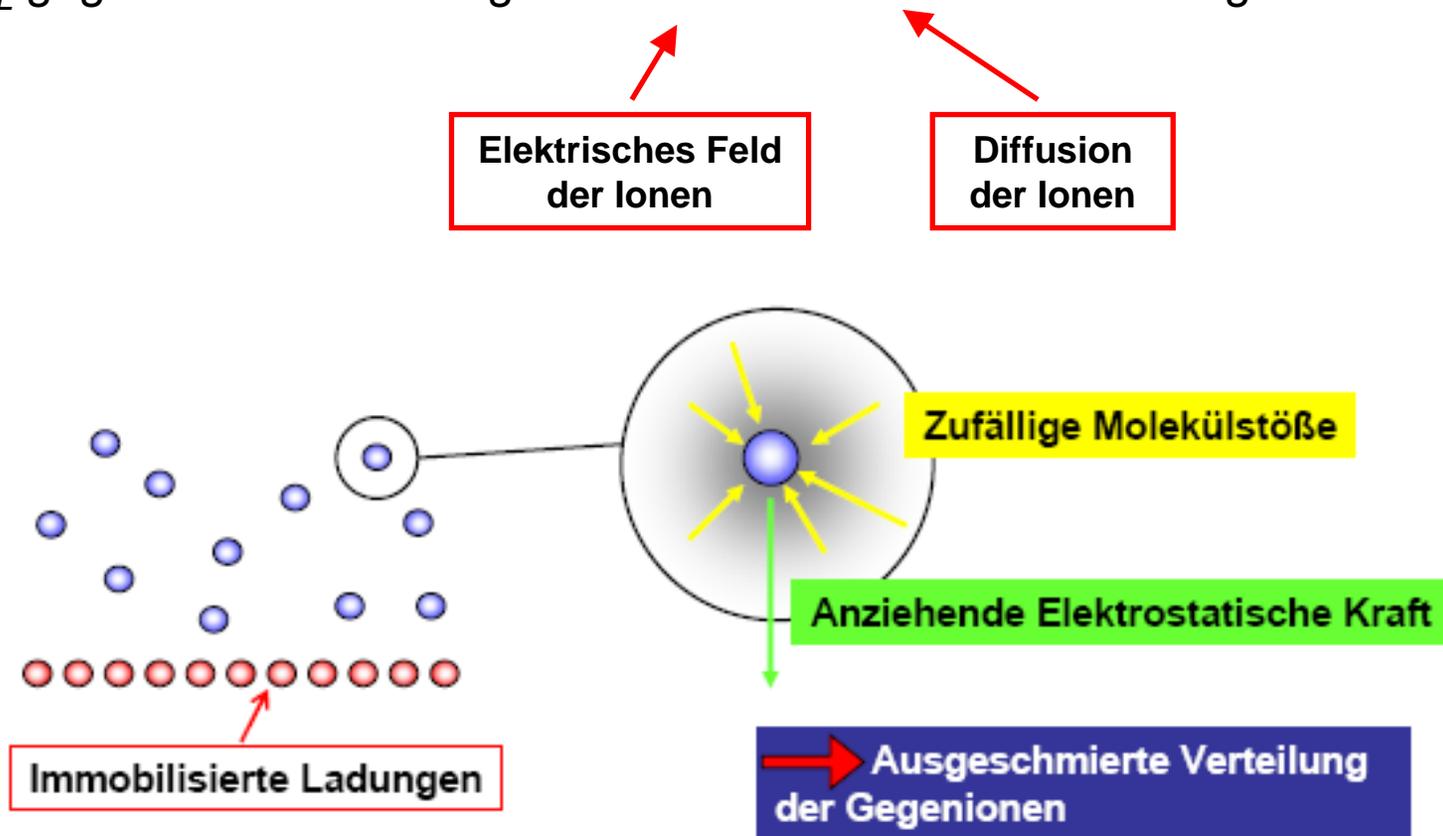
Poisson-Gleichung:

$$-\operatorname{div} E = \operatorname{div}(\nabla\Phi) = \Delta\Phi = -\frac{\rho_q}{\varepsilon}$$

## Kopplung von Elektrodynamik und Hydrodynamik:

Beeinflussung von Mikroströmungsphänomenen (Diffusion) durch das Potential in der EDL und umgekehrt.

→  $\Phi_{EDL}$  gegeben durch Lösung der Poisson-Boltzmann-Gleichung





# Herleitung der Poisson-Boltzmann-Gleichung

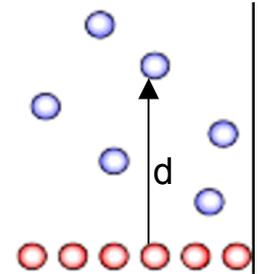
Poisson-Gleichung:  $\Delta\Phi_{EDL} = -\frac{\rho_q}{\varepsilon}$

Ladungsdichte:  $\rho_q = \rho_0 + \sum n_i$

Elektrostatische Energie eines Ions:  $E_{pot} = q\Phi_{EDL}$  falls  $\Phi_{EDL} \sim d$

Boltzmann-Verteilung der Ladungsträger:

$$n_i = n_{i0} \exp\left(-\frac{z_i e \Phi_{EDL}}{kT}\right)$$



Poisson-Boltzmann-Gleichung:

$$\Delta\Phi_{EDL} = -\frac{\rho_0}{\varepsilon} + \frac{e}{\varepsilon} \sum z_i n_{i0} \exp\left(-\frac{z_i e \Phi_{EDL}}{kt}\right)$$



# Vereinfachung der Poisson-Boltzmann-Gleichung

Linearisierte und vereinfachte  
Poisson-Boltzmann-Gleichung:

$$\Delta\Phi_{EDL} = \kappa\Phi_{EDL}$$

mit der inversen Debye-Hückel-Länge  $\kappa^2 = \left(\frac{1}{\lambda_D}\right)^2 = \frac{2e^2 N_A}{\epsilon kT}$

Analytisch nur für einfache geometrische Strukturen lösbar:

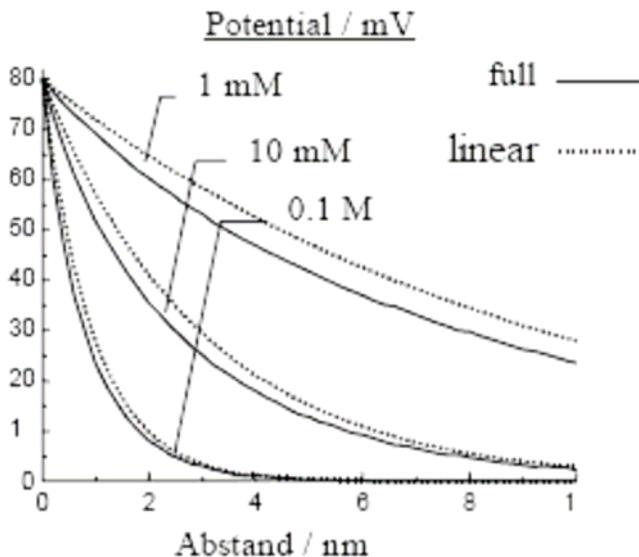
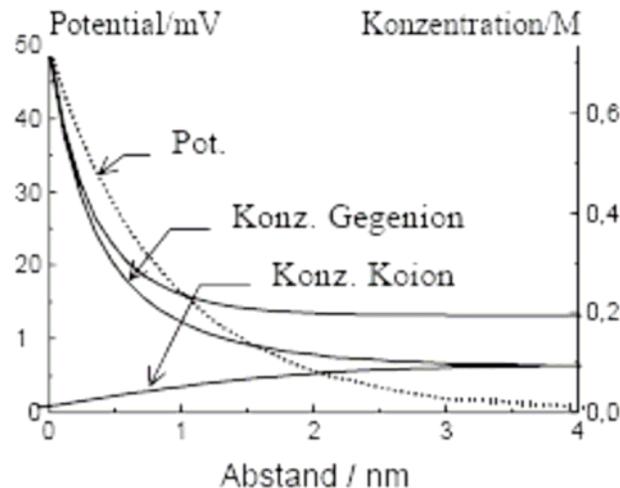
- Kugelsymmetrie (Ionen, Cluster, Kolloide) [Tanford-Kirkwood]
- Zylindersymmetrien (z. B. DNA)
- ebene Geometrien (Membranen, planare Oberflächen) [Gouy-Chapman]



# Lösung der Poisson-Boltzmann-Gleichung für planare Grenzfläche

$$\Delta\Phi_{EDL} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Phi_{EDL} = \kappa\Phi_{EDL}$$

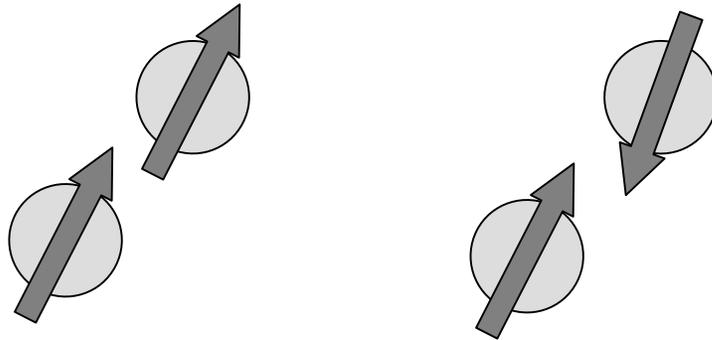
$$\Phi_{EDL} = A \exp(-\kappa x)$$



- Das Potential nimmt exponentiell mit dem Abstand ab.
- Die Salzkonzentration fällt steiler ab als das Potential.
- Die gesamte Ionenkonzentration ist nahe an der Oberfläche/Membran erhöht.
- Mit zunehmender Elektrolyt-konzentration  $c^B$  fällt das Potential stärker ab:  $c^B \sim 1/A$ , d.h. die elektrostatische Abstoßung nimmt ab.
- Mit zunehmender Debye-Länge  $\lambda_D \sim 1/\kappa$  wird die elektrostatische Abstoßung größer:  $A \sim 1/\kappa$ .

Van-der-Waals-Wechselwirkung (-Kräfte) kommen durch Anziehung bzw. Abstoßung von atomaren und molekularen Dipolen zustande. Dabei kann es sich um Wechselwirkungen zwischen permanenten und/oder induzierten Dipolen handeln.

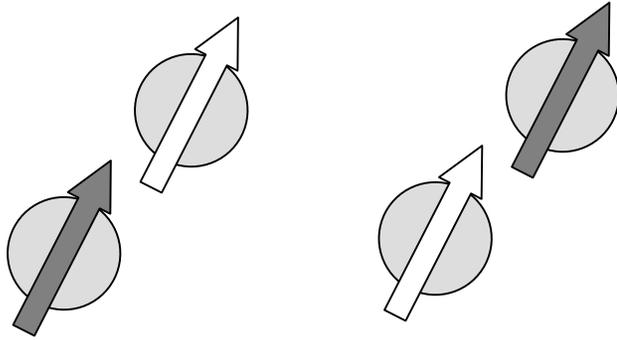
## Wechselwirkung zwischen permanenten Dipolen (Richteffekt)



- gleiche Ausrichtung der permanenten Dipole energetisch begünstigt
- Ausrichtung der Dipole überlagert durch Wärmebewegung

$$V = \frac{2}{3kT} \left( \frac{\mu_1 \mu_2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{r^6}$$

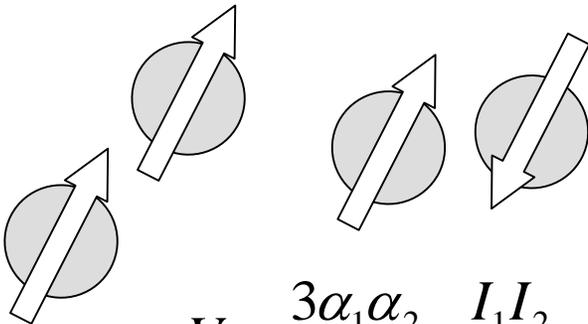
## Wechselwirkung zwischen permanenten und induzierten Dipolen (Induktionseffekt)



- Wechselwirkung zwischen polaren und apolaren Atomen/Molekülen
- Keine T-Abhängigkeit

$$V = \frac{\mu_1^2 \alpha_2}{4\pi\epsilon_0 r^6}$$

## Wechselwirkung zwischen induzierten Dipolen (Dispersionseffekt)



$$V = \frac{3\alpha_1\alpha_2}{2} \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} \frac{1}{r^6}$$

Londonsche Formel

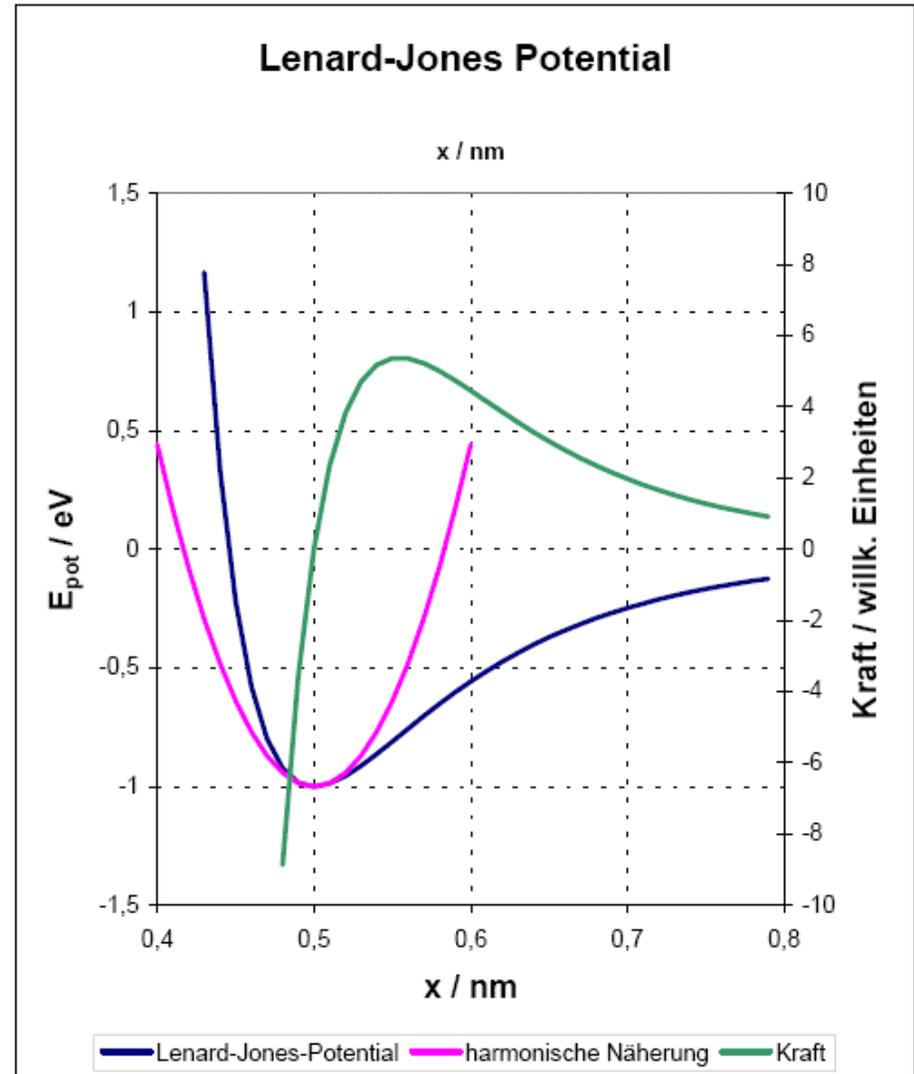
- Induzierte Dipole werden durch Schwankungen in der Ladungsdichte hervorgerufen.
- Bei größeren Atomen/Molekülen sind Ladungen leichter verschiebbar.
- Induzierte Dipole rufen weitere induzierte Dipole hervor.
- Ww verschwinden im zeitlichen Mittel **nicht**.

Von Lenard-Jones eingeführtes Modellpotential zur Beschreibung zwischenmolekularer Kräfte:

allgemein:  $V = \frac{C_m}{r^m} - \frac{C_n}{r^n}$

meistens:  $V = \frac{C_{12}}{r^{12}} - \frac{C_6}{r^6}$

Abstoßung („harte Billardkugeln“) bei geringen Abständen





Neben der elektrostatischen Wechselwirkung zwischen Kolloiden/geladenen Partikeln spielt die van-der-Waals-Wechselwirkung eine wichtige Rolle. Sie beschreibt die Wechselwirkung zwischen permanenten, induzierten und fluktuierenden Dipolen und gehorcht bei zwei einzelnen Dipolen einer  $r^6$ -Abhängigkeit:

$$V_A = -\frac{\beta_{12}}{r^6}$$

## Teilchen als ausgedehnte Platten

$$V_A = -\frac{H_{12}}{12\pi D^2}$$

$H_{12}$	Hamaker-Konstante
$D$	Teilchenabstand
$a$	Teilchenradius

## Sphärische Teilchen

$$V_A = -\frac{H_{12}a}{12D}$$

### Hamaker-Konstante

(stoffspezifisch Konstante, unabhängig von der Geometrie)

Metalle	$(10-30) \cdot 10^{-20}$ J
Halogenide/Oxide	$(1-3) \cdot 10^{-20}$ J
Org. Verbindungen	$(0,3-1) \cdot 10^{-20}$ J

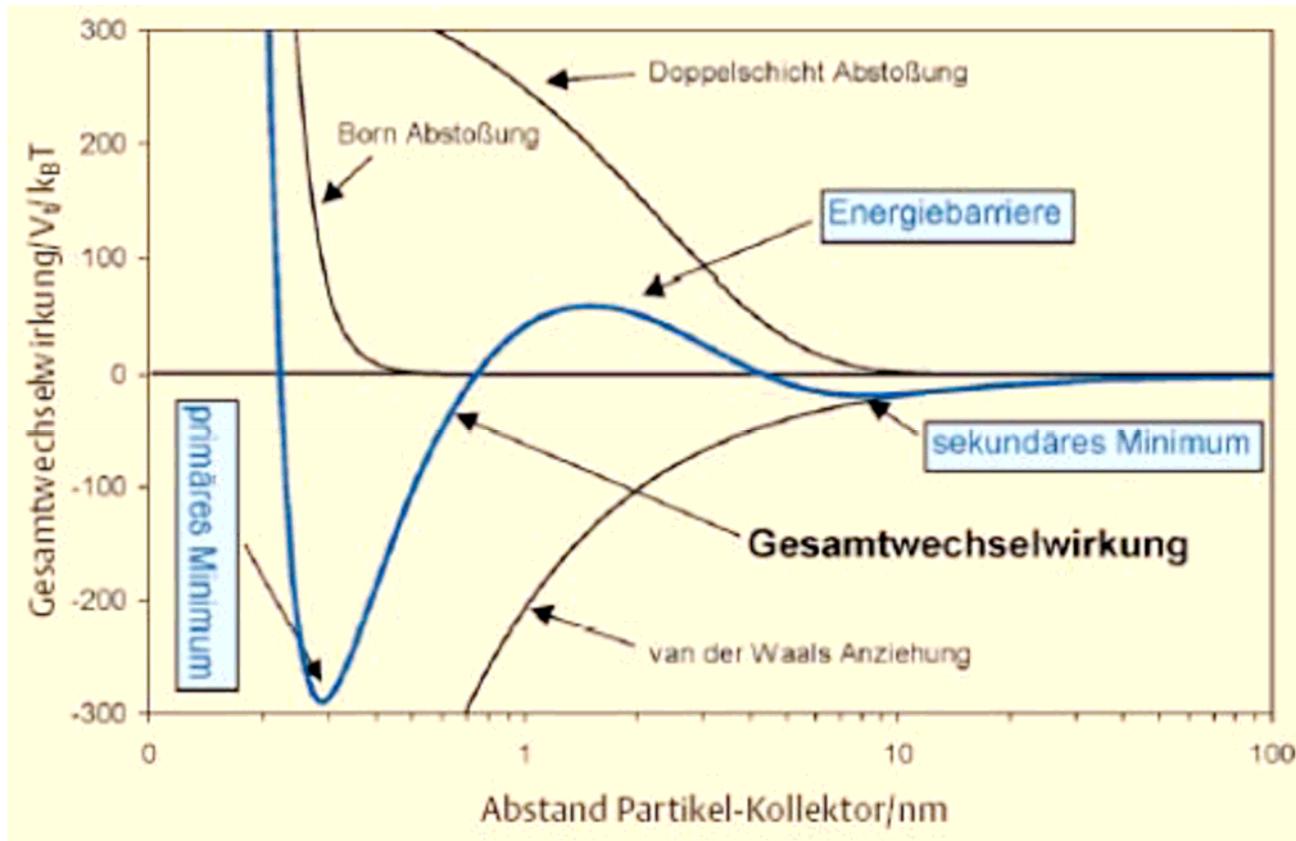


# DLVO-Theorie

DLVO: Derjaguin, Landau, Verwey, Oberbeek  
(1941, 1948)

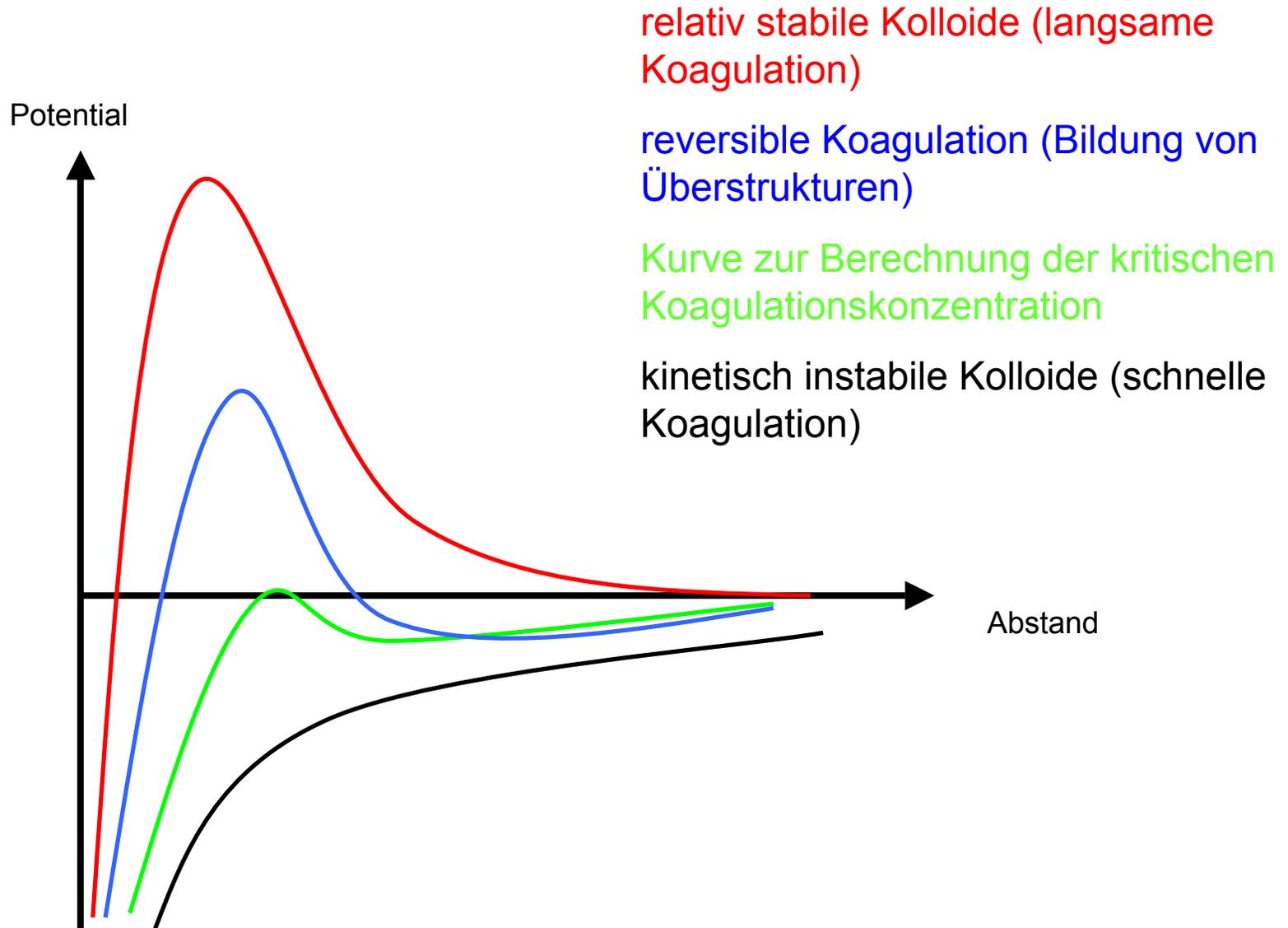
Grenzflächenchemie  
SS 2006  
Dr. R. Tuckermann

## Überlagerung der elektrostatischen und der van-der-Waals-Wechselwirkung





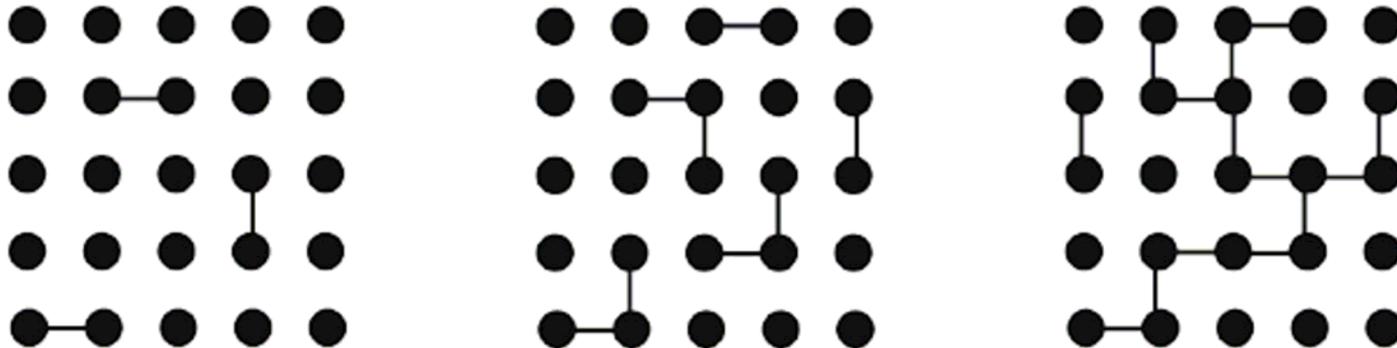
# DLVO-Theorie





Ein **Gel** (von lat. *gelu* „Frost, Kälte, Eis“ oder *gelatus* „gefroren, erstarrt“) wird in der Regel als ein feindispersives System aus mindestens einer festen und einer flüssigen Phase definiert, stellt also ein Kolloid dar. Diese feste Phase bildet dabei ein schwammartiges, **dreidimensionales Netzwerk**, dessen Poren durch eine Flüssigkeit bzw. auch ein Fluid ausgefüllt sind.

<http://www.wikipedia.org/wiki/gel> (12. Juni 2006)





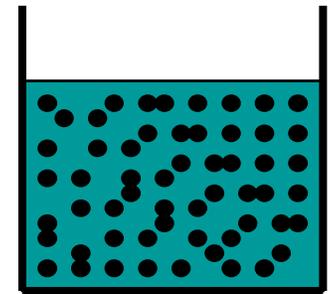
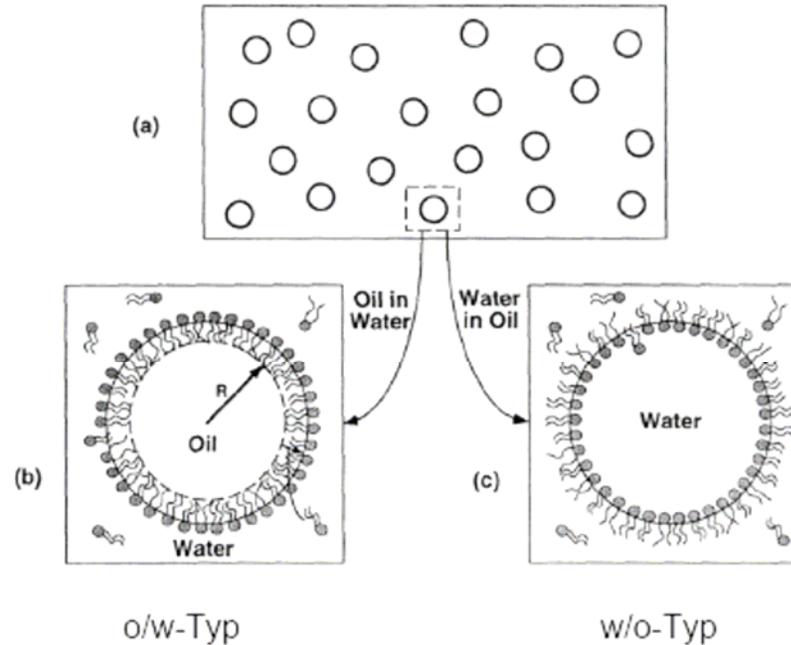
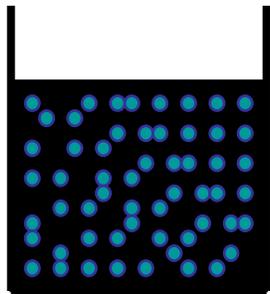
Unter einer **Emulsion** versteht man ein fein verteiltes Gemisch zweier nicht mischbarer Flüssigkeiten (z. B. Wasser und Öl) ohne sichtbare Entmischung. Emulsionen können durch den Zusatz von Emulgatoren stabilisiert werden. Emulgatoren senken die Energie der Phasengrenze und wirken so einer Entmischung der Emulsion.

Thermodynamisch stabile, völlig transparente Mischungen (**Mikroemulsionen**) sind immer durch ein Tensid stabilisiert. Metastabile, stark lichtstreuende Mischungen (**Makroemulsionen**) können durch ein Tensid, Polymer oder Feststoff stabilisiert werden.

Die Herstellung einer (Makro-) Emulsion erfordert durch Schaffung neuer Oberflächen einen Energieaufwand:

$$\Delta G = \sigma A = \sigma 3V/R$$

$\Delta G$  ist die treibende Kraft für die Instabilität bzw. Zerfall von Emulsionen.



## Eigenschaften:

- 2-Phasen-System (*innere & äußere Phase*)
- charakterisiert durch das *Volumenverhältnis*

$$\phi = \frac{V_{\text{innere Phase}}}{V_{\text{gesamt}}}$$

$$\phi = 0.74 \text{ for packed spheres}$$

- Viskosität (O/W):  $\eta = \eta_0 (1 + 2,5\phi)$
- thermodynamisch instabil

## Bancroft-Regel:

Die äußere Phase ist diejenige, in der der Emulgator besser löslich ist

## Beispiele:

SDS ( $C_{12}SO_4^-$ ): wasserlöslich  $\Rightarrow$  O/W-Emulgator  
Stearinsäure: wasserunlöslich  $\Rightarrow$  W/O-Emulgator ( $C_{18}COOH$ )



## HLB = hydrophile-lipophile-balance

Vollkommen empirischer Ansatz, der das Verhältnis zwischen dem lipophilen und hydrophilen Charakter des Emulgators angibt:

### Methode nach Griffin

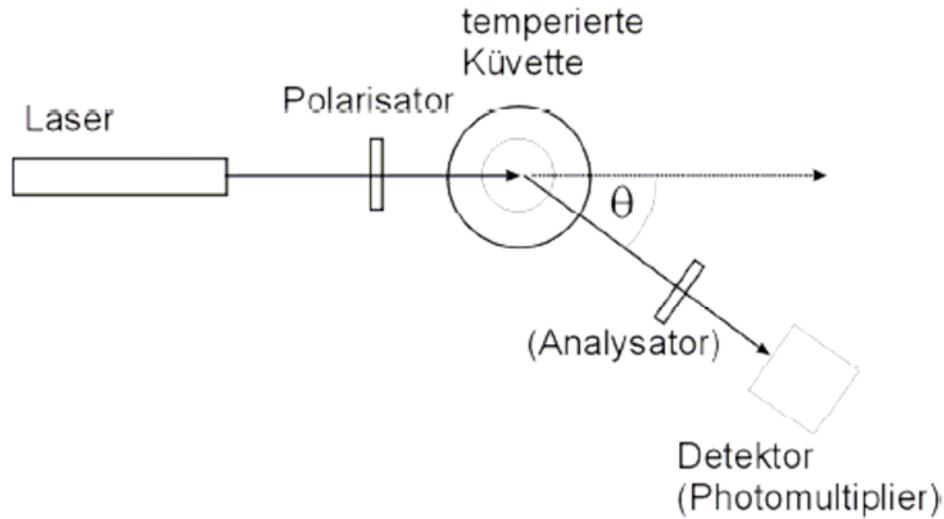
$$HLB = 20 \frac{M_{hydrophil}}{M_{gesamt}}$$

HLB-Zahl des Tensids	Verwendung
1,3 – 3	Antischaummittel
3 – 8	w/o-Emulgatoren
7 – 9	Netzmittel
8 – 18	o/w-Emulgatoren
13 - 15	waschaktive Stoffe

### Methode nach Davies

$$HLB = 7 + \sum_i^{hydrophil} n_i H_i + \sum_j^{hydrophil} n_j H_j$$

- $n_i$  Anzahl hydrophiler Gruppen im Molekül
- $H_i$  Wert der hydrophilen Gruppe
- $n_j$  Anzahl lipophiler Gruppen im Molekül
- $H_j$  Wert der lipophilen Gruppe

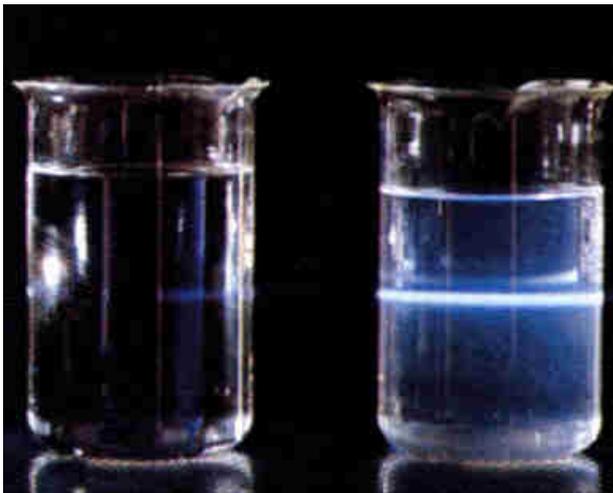


**Rayleigh-Streuung** ( $d < \lambda/20$ ): Kolloide können relativ zur Wellenlänge als punktförmige Teilchen betrachtet werden.

**Debye-Streutheorie** ( $d > \lambda/20$ ): Auftreten von Interferenzen gegenüber der reinen Rayleigh-Streuung.

**Mie-Streuung** ( $d \geq \lambda$ ): Größe der Streuzentren im Bereich der Wellenlänge.

Der **Tyndall-Effekt** ist benannt nach seinem Entdecker John Tyndall (1820-1893), der die Streuung von Licht in kolloiden Lösungen untersucht hat: An submikroskopischen Schwebeteilchen (mit Abmessungen ähnlich der Lichtwellenlänge), die in einer Flüssigkeit oder einem Gas gelöst sind, wird Licht aus einem durchtretenden Strahlenbündel seitlich herausgestreut. Dadurch wird der gesamte Lichtstrahl auch von der Seite her sichtbar, beispielsweise bei Sonnenschein im Nebel- oder auch nachts die Lichtkegel von Scheinwerfern in Nebel oder Wolken.



Kochsalz-  
Lösung

Tensid-  
Lösung





Die Lichtstreuung beruht allgemein darauf, dass durch die Lichtwelle im Kolloidteilchen Dipole mit Ausrichtung in Polarisationsrichtung des Lichtes induziert werden. Die induzierten Dipole wiederum strahlen ein Lichtfeld der gleichen Frequenz ab. Die Entfernungs- und Winkelabhängigkeit eines solchen Hertzschen Dipols ist gegeben als

$$\frac{I_S(r, \theta, \varphi)}{I_0} = \frac{8\pi^4 \alpha^2 \sin^2 \varphi (1 + \cos^2 \theta)}{\lambda^4 r^2}$$

die bekannte Formel für die Rayleigh-Streuung des Lichtes.

Rayleigh-Verhältnis: 
$$R_\theta = \frac{I_S(r, \theta, \varphi)}{I_0} \frac{r^2}{(1 + \cos^2 \theta)V} = \frac{8\pi^4 \alpha^2}{\lambda^4 r^2}$$

**Fundamentalgleichung der Lichtstreuung**

$$\frac{Kc}{R_\theta} = \frac{1}{M}$$

mit

$$K = \frac{2\pi n^2}{N_A \lambda^4} \left( \frac{\partial n}{\partial c} \right)^2$$



Bei ausgedehnten Nanopartikel mit  $d > \lambda/20$  wirken sich intramolekulare Interferenzeffekte aus, d.h. Licht von verschiedenen Teilbereichen eines Teilchens steht in einer festen Phasenbeziehung zueinander. Die Folge ist, dass mehr Licht nach vorne als nach hinten gestreut wird.

**Fundamentalgleichung der Lichtstreuung**

$$\frac{Kc}{R_\theta} = \frac{1}{MP(\theta)}$$

Der Streufaktor  $P(\theta)$  hängt in einer charakteristischen Weise von der Form der Teilchen ab (Knäuel, Kugel, Stäbchen).

Die Streuung elektromagnetischer Strahlung an sehr großen Partikeln ( $d \approx \lambda$ ) kann man nicht mehr durch die Rayleigh-Beziehung verstehen. Vielmehr ist es hier notwendig die Mie-Theorie zu bemühen. Diese ist sehr komplex und weist zwei wesentliche Unterschiede zur Rayleigh-Streuung auf:

- (i) Die Streuintensität ist nicht von der Wellenlänge der einfallenden elektromagnetischen Strahlung abhängig.
- (ii) Die Richtungsverteilung der Streuung ist sehr viel asymmetrischer als bei der Rayleigh-Streuung.

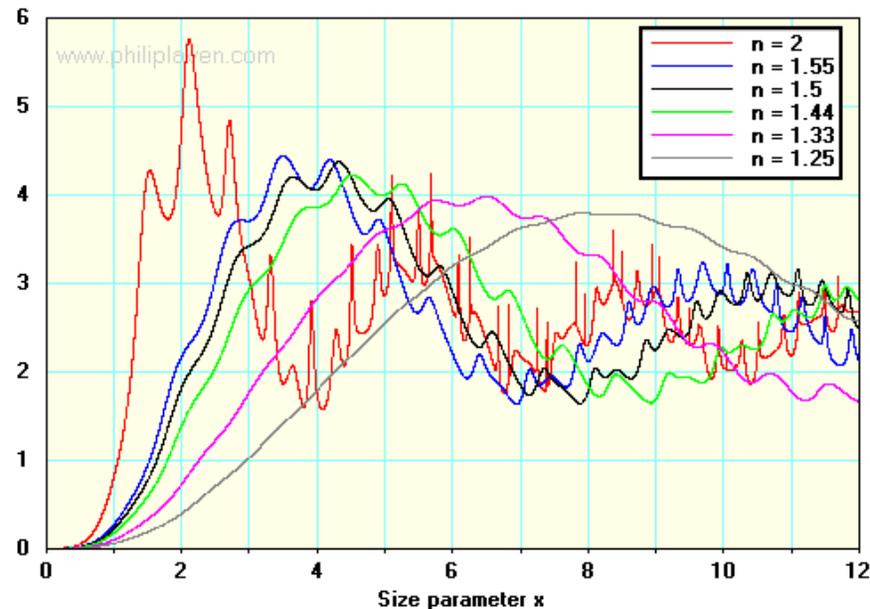


Fig. 3  $Q_{ext}$  versus size parameter  $x$  for different values of refractive index  $n$