

Thermodynamik im Unterricht: Chemisches Potenzial von Anfang an



Regina Rüffler, Georg Job



**c/o. Institut für Physikalische Chemie,
Universität Hamburg**

Westfälische Wilhelms-Universität

Münster, 19.1.2009

Einführung

Auch, wenn der Nutzen der chemischen Thermodynamik außer Frage steht, so steht sie doch im Ruf, schwer verständlich zu sein. Gerade eine der grundlegenden Größen, das **chemische Potenzial μ** , meist beschrieben als partielle Ableitung $(\partial G/\partial n)_{p,T}$ einer Größe, in die Energie und Entropie involviert sind, erscheint als komplizierter Begriff.

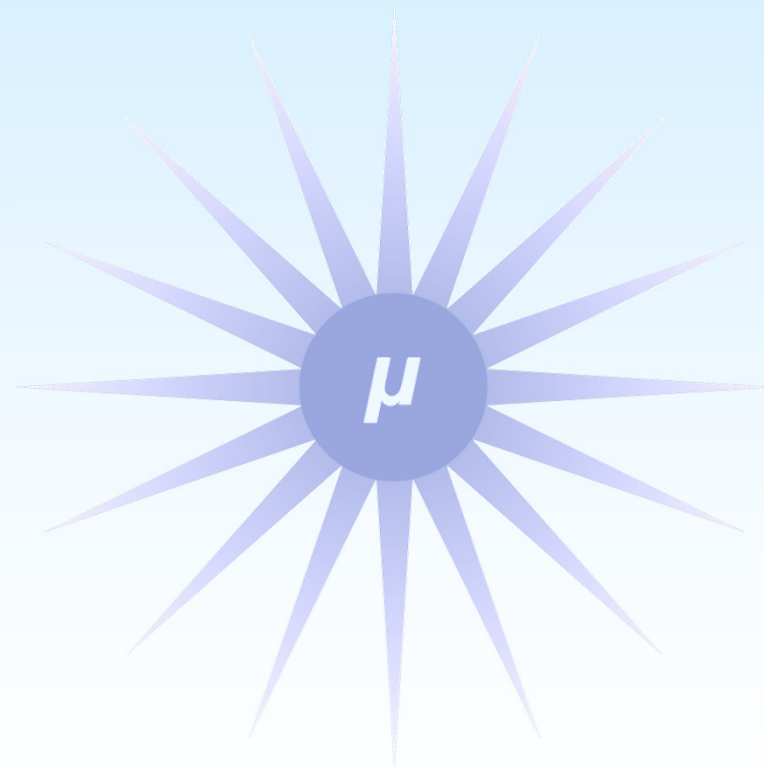
Als ein Einstieg, der keine besonderen Vorkenntnisse erfordert, schlagen wir daher vor, μ als Grundbegriff einzuführen, wie es bei Basisgrößen wie Länge etc. üblich ist. Der einfache Zugang macht den Begriff selbst für den Anfängerunterricht interessant. Ausgewählte Schauversuche tragen dazu bei, eine Brücke zwischen Lehrbuchwissen und eigener Erfahrung zu schlagen.



Gliederung

1. Chemisches Potenzial als Grundbegriff
2. Grundmerkmale des chemischen Potentials
3. Quantifizierung des chemischen Potentials
4. Erste Anwendungen μ
5. Einfluss des Umfeldes auf das Potenzial
6. Massenwirkung – eine Frage des Umfeldes
7. Begleitender Energieumsatz
8. Ausblick

1. Chemisches Potenzial als Grundbegriff



Grundbegriff chemisches Potenzial

Um

- einen Gegenstand zu ergreifen,
- eine Kartoffel zu schälen
- einen Knopf anzunähen,

braucht man die Anatomie einer Hand nicht zu kennen!



~~$$\mu = \left(\frac{\partial G}{\partial n} \right)_{p,T}$$~~

Um

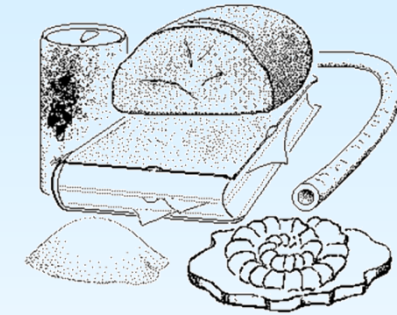
- das **chemische Potenzial** μ zu handhaben,
- chemische Reaktionen vorauszusagen,
- Zustandsdiagramme zu berechnen ...,

ist der thermodynamische Apparat nicht nötig!

Grundbegriff chemisches Potenzial

Ausgangspunkt: Alltagserfahrung, dass die uns umgebenden Dinge sich gestaltlich wie auch stofflich mehr oder weniger schnell verändern (HERAKLIT: „Alles fließt – nichts besteht“), z.B.

- Brot wird trocken,
- Eisen rostet,
- Gesteine verwittern usw.



Es altern aber auch

- luft- und lichtdicht eingeschlossene Lebensmittel und Chemikalien
- ⇒ Stoffe neigen von sich aus dazu, sich umzubilden, d.h., jedem Stoff ist ein ihm eigener „Umbildungstrieb“ zuzuschreiben.

Das chemische Potenzial kann aufgefasst werden

als ein **Maß für den Umbildungstrieb** eines Stoffes



Grundlage für *phänomenologische Charakterisierung*

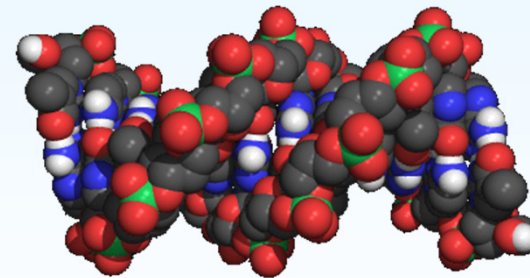
Phänomenologische Charakterisierung

Ein Objekt oder Lebewesen wird durch
seine *äußeren Eigenschaften* beschrieben und
nicht durch seinen *inneren Aufbau*.

Was ist ein Präriehund?



phänotypisch



genotypisch

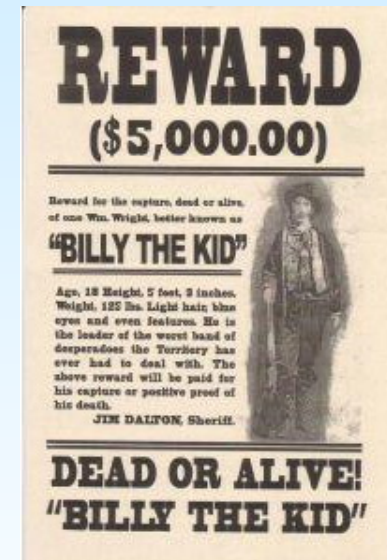
Phänomenologische Charakterisierung

Um eine Person zu erkennen, genügt ihre Beschreibung mittels weniger Merkmale:

- Größe: 5 Fuß 3 Zoll
- Gewicht: 65 kg
- blondes Haar
- blaue Augen
- 18 Jahre alt
- gefährlicher Revolverheld

Das „Bündel“ dieser Merkmale ist im Grunde das, was eine Person ausmacht, ihr Name nur ein Kürzel für dieses Bündel.

Ziel ist also quasi einen „Steckbrief“ des chemischen Potenzials μ zu entwerfen, der ausreicht, um es als messbare physikalische Größe zu definieren.

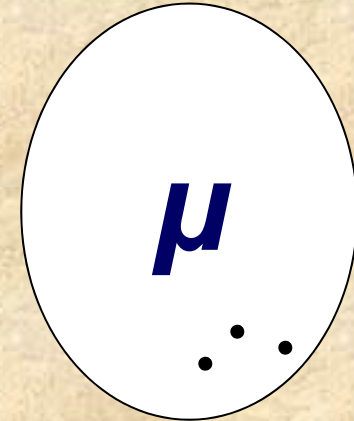


2. Grundmerkmale des chemischen Potentials



Wanted

- ◆ Die Neigung eines Stoffes
 - sich mit anderen Substanzen *umzusetzen*,
 - sich in eine andere Zustandsart *umzuwandeln*,
 - sich im Raum *umzuverteilen*,
 lässt sich durch ein und dieselbe Größe – sein chemisches Potenzial μ – ausdrücken.
- ◆ Die Stärke dieser Neigung, d.h., der Zahlenwert von μ
 - wird durch die *Art* des Stoffes bestimmt
 - und durch das *Umfeld* (Temperatur, Druck, Konzentration, Art des Lösemittels ...),
 - aber nicht durch die Art der Reaktionspartner oder Produkte.
- ◆ Eine *Umsetzung*, *Umwandlung*, *Umverteilung* kann freiwillig nur eintreten, wenn die Neigung hierzu im Ausgangszustand stärker ausgeprägt ist als im Endzustand.



Gewicht als Vorbild

Dass es leichte und schwere Dinge gibt, gehört zu unserer aller Erfahrung. Der Umgang mit Waage und Wägestücken ist jedermann geläufig – auch ohne Schulchemie und -physik.

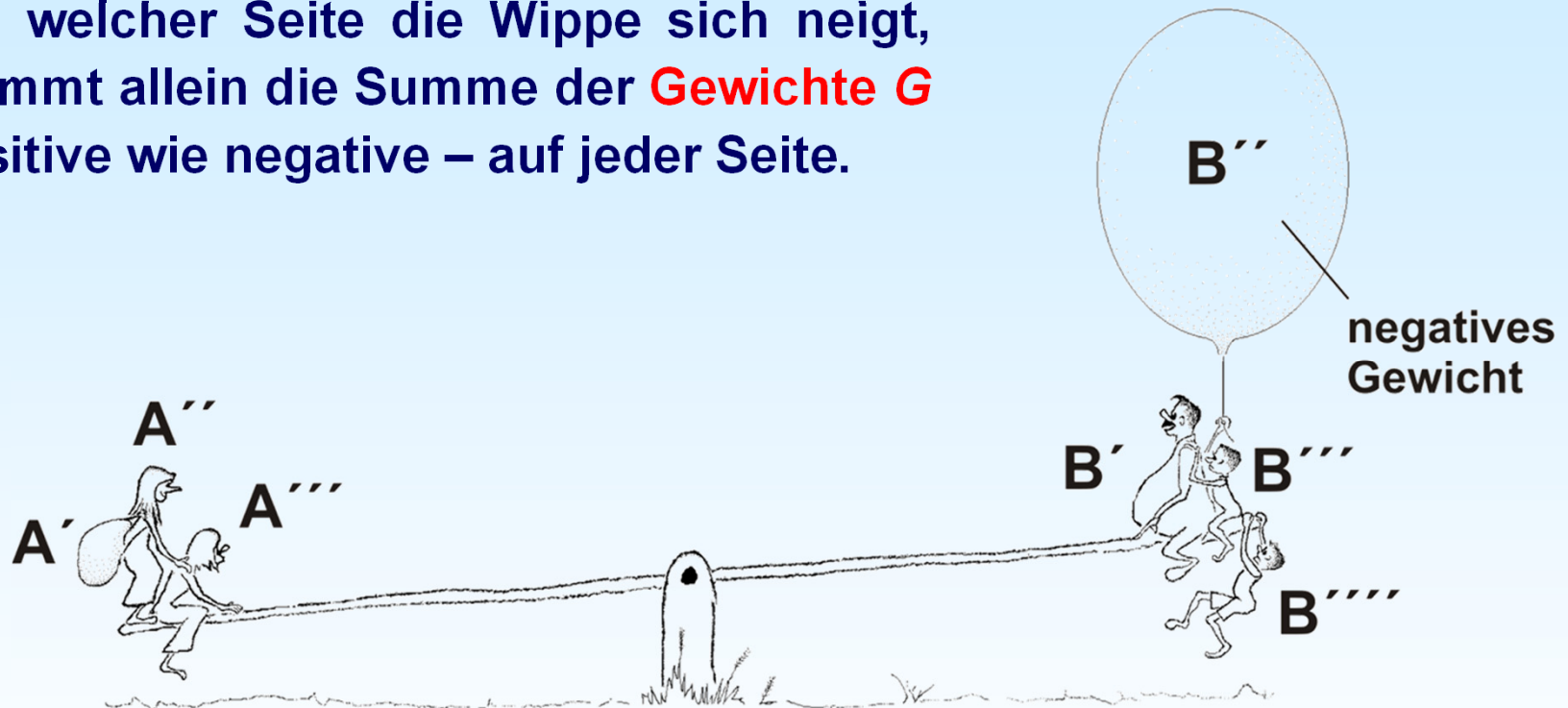


Das Gewicht G – der „Trieb“ eines Gegenstandes, zu Boden zu sinken – kann daher als einfaches Muster für die *Metrisierung* einer Eigenschaft und damit für die Definition einer physikalischen Größe dienen.

Das Spiel der Gewichtskräfte an einer Waage ist zudem ein gern benutztes Vorbild für die Einstellung stofflicher Gleichgewichte, ja, für stoffliche Vorgänge überhaupt.

Gewicht als Vorbild

Nach welcher Seite die Wippe sich neigt, bestimmt allein die Summe der **Gewichte G** – positive wie negative – auf jeder Seite.



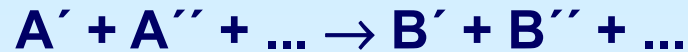
allgemein:

Die linke Seite gewinnt, wenn $G(A') + G(A'') + \dots > G(B') + G(B'') + \dots$

Gleichgewicht herrscht, wenn $G(A') + G(A'') + \dots = G(B') + G(B'') + \dots$

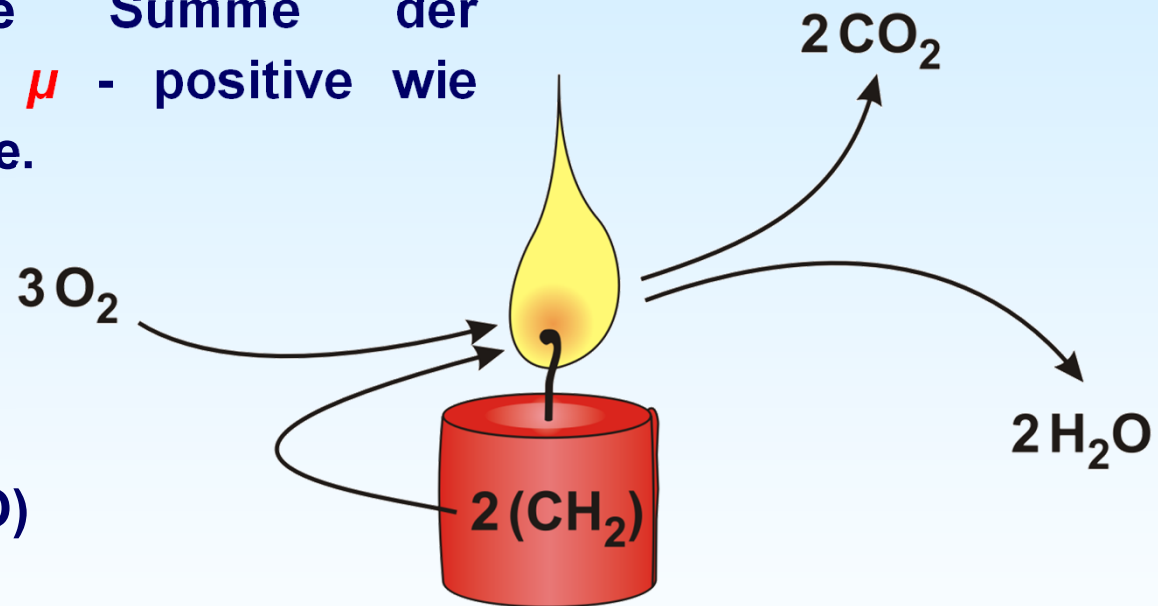
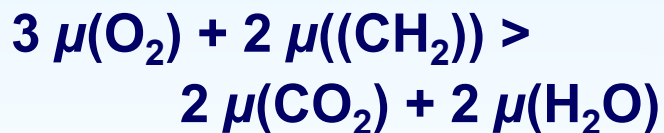
Wettstreit der Stoffe

Nach welcher Seite eine Umsetzung strebt,



bestimmt allein die Summe der **chemischen Potentiale μ** - positive wie negative - auf jeder Seite.

Die Kerze brennt, weil



allgemein:

Die linke Seite „gewinnt“, wenn



Gleichgewicht herrscht, wenn



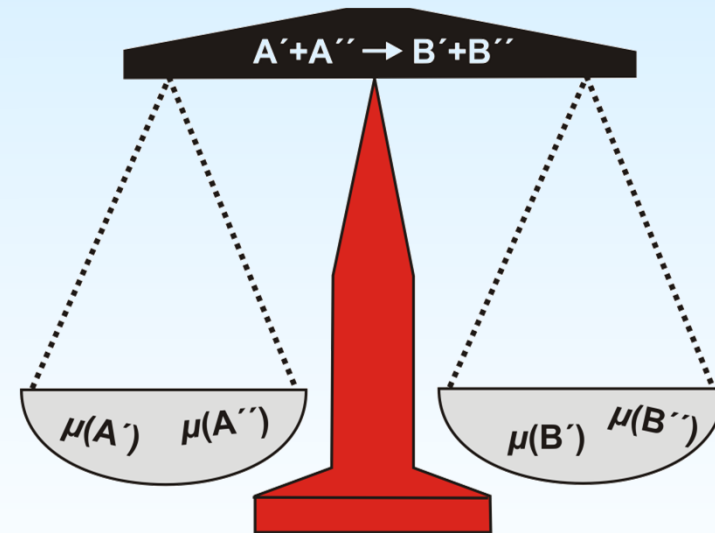
3. Quantifizierung des chemischen Potentials



Metrisierung des chemischen Potentials

Das *chemische Potenzial* eines Stoffes kann man auffassen als Ausdruck seines *Bestrebens zur Umbildung*. Ein Maß μ dafür kann man im Prinzip nach dem Vorbild des Gewichtsmaßes festlegen.

Jede ausführbare Reaktion stellt gleichsam eine *Waage* dar, die den Vergleich von Potenzialwerten oder ihrer Summen zulässt. Allerdings scheitert eine Messung vielfach an irgendwelchen *Hemmungen*, also daran, dass die Waage „klemmt“. Dann helfen nur indirekte Verfahren weiter.



Da es uns hier nur um ein erstes Kennen lernen geht, setzen wir uns zunächst über alle Schwierigkeiten hinweg und betrachten die μ -Werte der Stoffe als gegeben.

Bezugsniveau für das chemische Potenzial

Bergeshöhen pflegt man nicht gegenüber dem Erdmittelpunkt anzugeben, sondern gegenüber dem Meeresspiegel, Temperaturen im Alltag nicht gegenüber dem absoluten Nullpunkt, sondern gegenüber dem Gefrierpunkt des Wassers.



Ähnlich ist es zweckmäßig, für die Werte chemischer Potentiale ein bequemes Bezugsniveau zu wählen, etwa die *reinen Elemente* in ihren stabilsten Zuständen unter *Normbedingungen* (298 K und 101 kPa). Deren chemisches Potenzial μ^\ominus wird gleich Null gesetzt.

Das ist möglich, solange wir – wie in der gesamten Chemie – Elementumwandlungen ausschließen.

Beispiele für Potenzialwerte

Reine Stoffe unter Normbedingungen (298 K, 101 kPa)

Stoff	Formel	μ^\ominus / kG	Einheit Gibbs, kurz G (= J/mol)
Eisen	Fe s	0	$\mu = 0$ für Elemente
Wasser	H ₂ O l	-237	$\mu < 0$ heißt, dass die Stoffe freiwillig aus den Elementen entstehen.
W.dampf	H ₂ O g	-229	
Kochsalz	NaCl s	-384	
Quarz	SiO ₂ s	-856	
Marmor	CaCO ₃ s	-1128	
Zucker	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ s	-1544	$\mu > 0$ heißt, dass die Stoffe zum Zerfall in die Elemente neigen.
Paraffin	≈(CH ₂) s	+4	
Benzol	C ₆ H ₆ l	+125	
Acetylen	C ₂ H ₂ g	+210	

Beispiele für Potenzialwerte

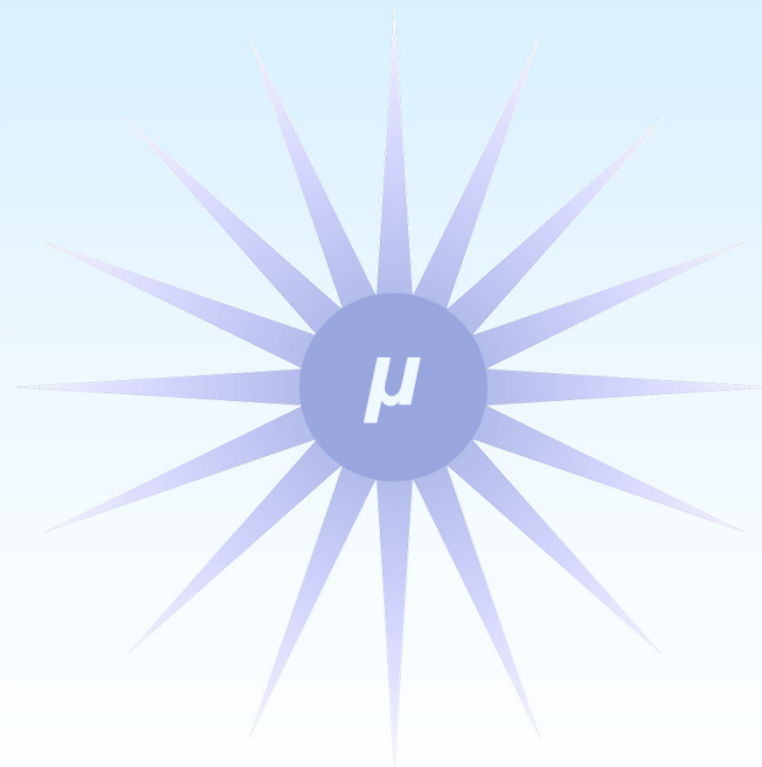
Gelöste Stoffe unter Normbedingungen

Stoff	Formel	μ^\ominus / kJ
Zucker	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \text{w}$	-1552
Kohlendioxid	$\text{CO}_2 \text{w}$	-386
Ammoniak	$\text{NH}_3 \text{w}$	-27
Iod	$\text{I}_2 \text{w}$	+17
Wasserstoff(I)	$\text{H}^+ \text{w}$	0
Natrium(I)	$\text{Na}^+ \text{w}$	-262
Chlor(I)	$\text{Cl}^- \text{w}$	-131
Calcium(II)	$\text{Ca}^{2+} \text{w}$	-553
Kupfer(II)	$\text{Cu}^{2+} \text{w}$	+66

Bei einem *gelösten Stoff* muss neben p und T noch die **Konzentration c** festgelegt werden. Man wählt als *Normwert* 1 kmol/m^3 (= 1 mol/L).

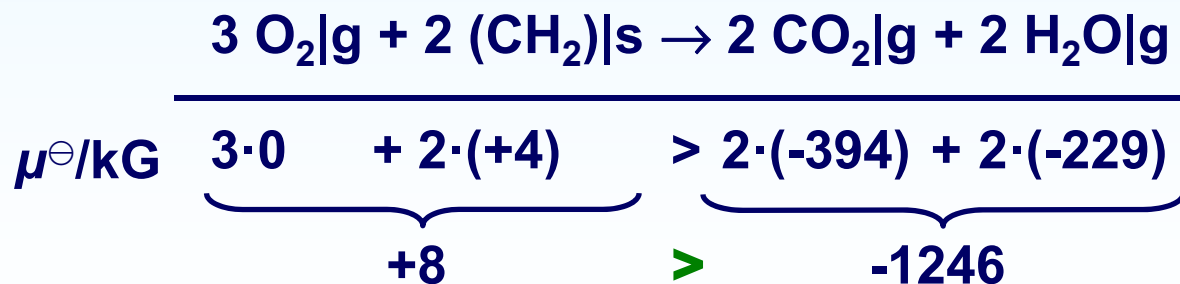
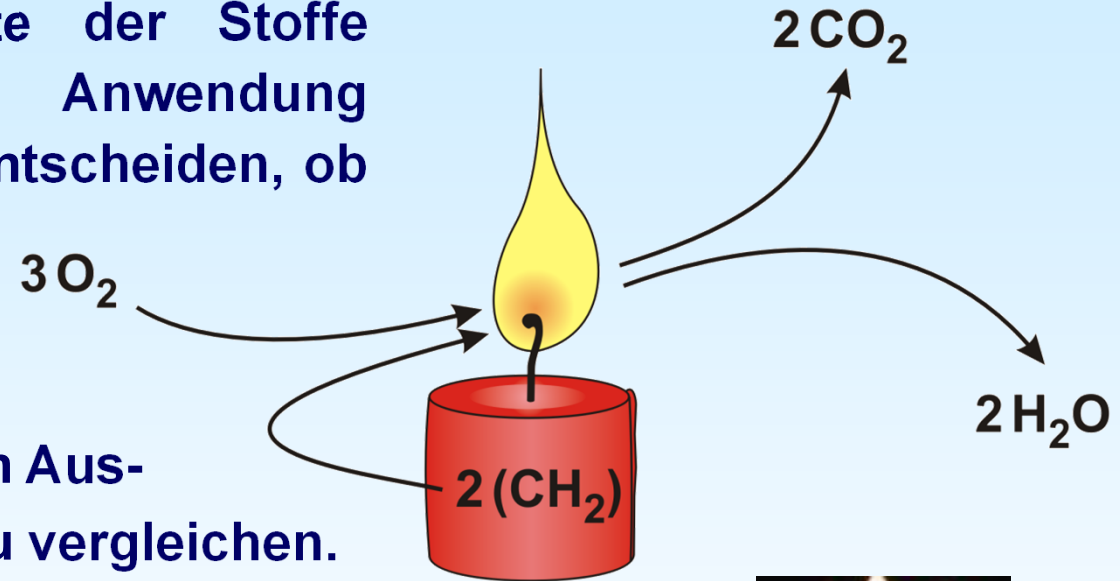
Auch **Ion** kann ein chemisches Potenzial zugeordnet werden. Die am häufigsten auftauchende Ionenart, H^+ , erhält in wässriger Lösung den μ^\ominus -Wert null.

4. Erste Anwendungen



Voraussage möglicher Reaktionen

Wenn die Potenzialwerte der Stoffe bekannt sind, ist die Anwendung denkbar einfach. Um zu entscheiden, ob ein Vorgang eintreten kann oder nicht, genügt es, die Summen der Potentiale im Ausgangs- und Endzustand zu vergleichen.



➔ Vorgang möglich!

1

Auflösen von Marmor

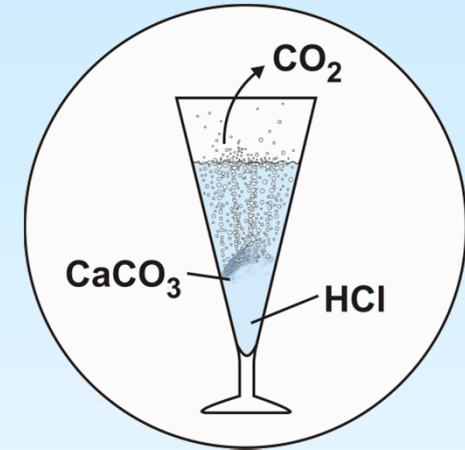


Versuchsdurchführung:

Marmorstücke werden in Salzsäure geworfen.

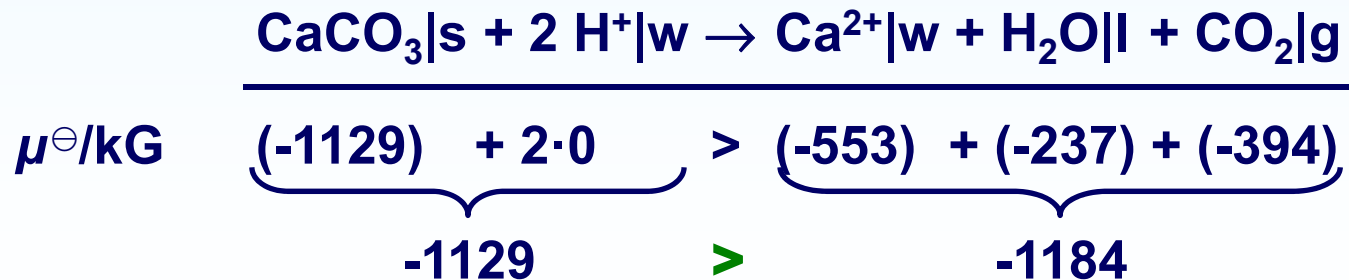
Beobachtung:

Es tritt eine lebhafte Gasentwicklung auf.

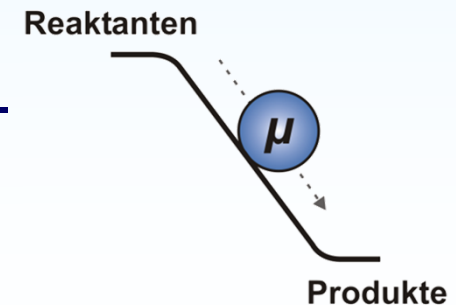


Erklärung:

Calciumcarbonat wird von Salzsäure unter Entwicklung von gasförmigem Kohlendioxid aufgelöst gemäß:

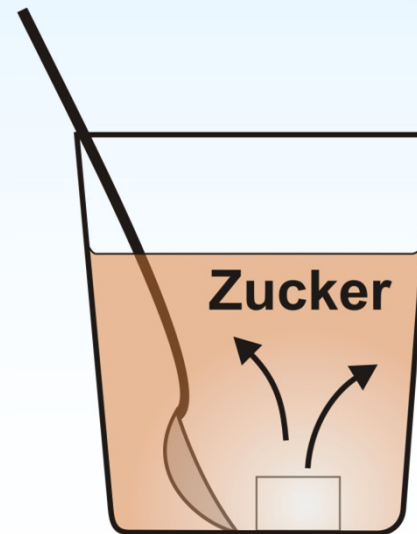
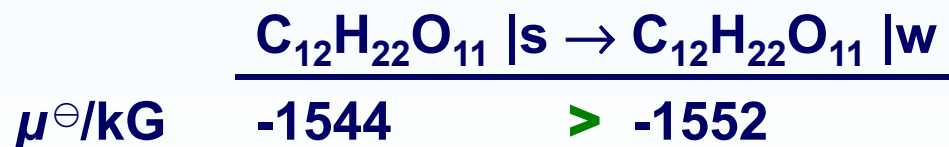


Reaktion möglich!



Löseverhalten

Auch die Auflösung von Stoffen in einem Lösemittel kann mit Hilfe des Potenzialbegriffes beschrieben werden, z.B. die Löslichkeit von Festkörpern wie Zucker oder auch von Gasen wie Ammoniak. Ob sich ein Stoff in Wasser, Alkohol etc. gut oder schlecht lösen lässt, ergibt sich dabei aus der Differenz der chemischen Potentiale im reinen und gelösten Zustand.

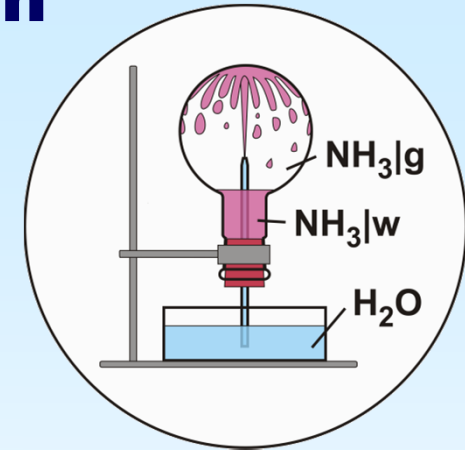


2

Ammoniak-Springbrunnen

Versuchsdurchführung:

Ein mit Ammoniakgas gefüllter Rundkolben wird über ein Steigrohr mit einer wassergefüllten Glaswanne verbunden.



2

Ammoniak-Springbrunnen

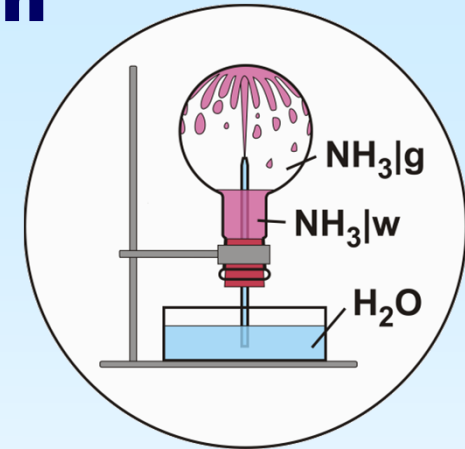


Versuchsdurchführung:

Ein mit Ammoniakgas gefüllter Rundkolben wird über ein Steigrohr mit einer wassergefüllten Glaswanne verbunden.

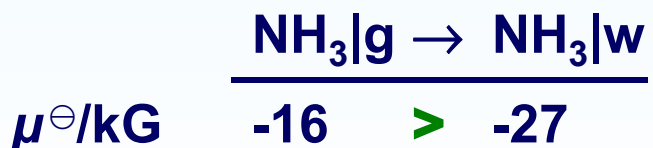
Beobachtung:

Das Wasser steigt zunächst langsam, dann in zunehmend kräftiger werdender violetter Fontäne nach oben.



Erklärung:

Ammoniakgas löst sich hervorragend in Wasser gemäß



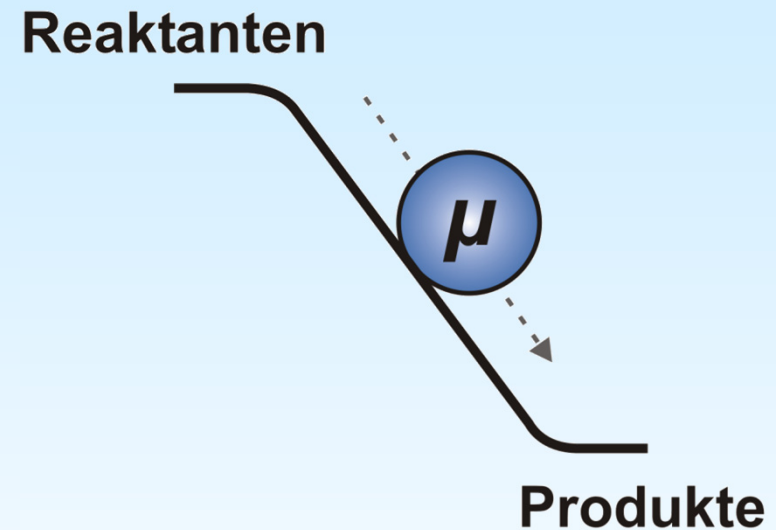
(1 L Wasser kann bei 20°C 702 L Ammoniakgas lösen!).

Schon das Eindringen weniger Tropfen Wasser genügt, um den Druck im Kolben drastisch zu senken, so dass weiteres Wasser im kräftigen Strahl nachgesogen wird.

Darstellung von Substanzen mit positivem μ

Da eine Umsetzung stets in Richtung eines Potenzialgefälles läuft, könnte bei oberflächlicher Betrachtung der Eindruck entstehen, als ob Stoffe mit positivem μ durch normale Reaktionen aus stabilen Stoffen (mit negativem μ) gar nicht entstehen könnten.

Die Bildung von Ethin (Acetylen), einem Gas mit hohem positivem Potenzial, aus Calciumcarbid und Wasser, beides Stoffe mit negativem Potenzial, zeigt, dass dies nicht zutrifft.



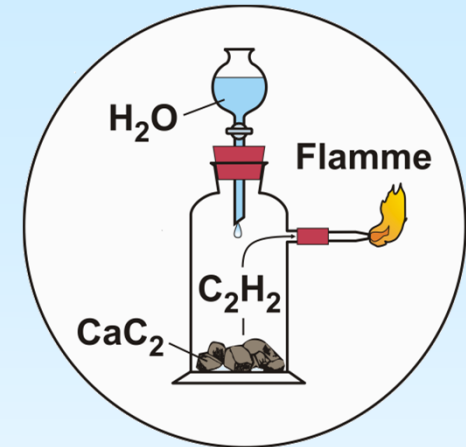
3



Karbidlampe

Versuchsdurchführung:

Man lässt Wasser auf einige Calcium-carbidbrocken tropfen.



Karbid-
lampe

3



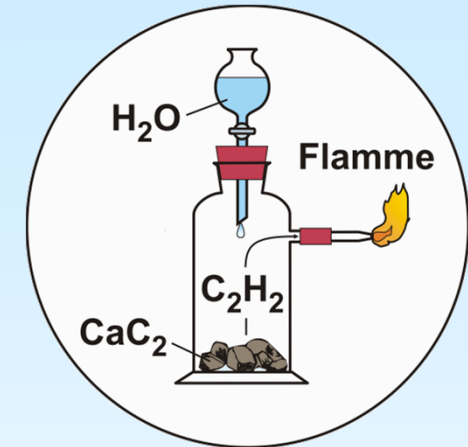
Karbidlampe

Versuchsdurchführung:

Man lässt Wasser auf einige Calcium-carbidbrocken tropfen.

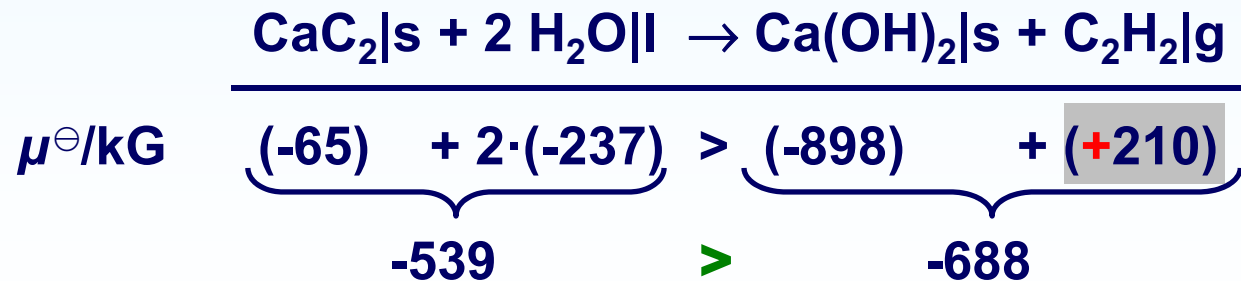
Beobachtung:

Das gebildete Ethin verbrennt mit stark rußender Flamme.



Erklärung:

Calciumcarbid wird von Wasser unter Bildung von Ethin (Acetylen) zersetzt nach:



auch Substanzen mit positivem μ sind herstellbar

5. Einfluss des Umfeldes auf das chemische Potenzial



Temperatur- und Druckabhängigkeit

Nur in nullter Näherung kann μ als konstant angesehen werden.

Eine verfeinerte Betrachtung berücksichtigt die Temperatur- und Druckabhängigkeit, wobei oft schon lineare Ansätze ausreichen:

$$\mu = \mu_0 + \alpha \cdot (T - T_0)$$

$$\mu = \mu_0 + \beta \cdot (p - p_0)$$

μ_0 : Anfangswert des chemischen Potentials

Für den **Temperatur-** (α) und **Druckkoeffizienten** (β) des chemischen Potentials eines Stoffes B gelten folgende Regeln:

$$\alpha(\text{B|g}) \ll \alpha(\text{B|l}) < \alpha(\text{B|s}) < 0$$

$$0 < \beta(\text{B|s}) < \beta(\text{B|l}) \ll \beta(\text{B|g})$$

Allein die Beachtung dieser qualitativen Regeln erlaubt schon viele nützliche Schlüsse.

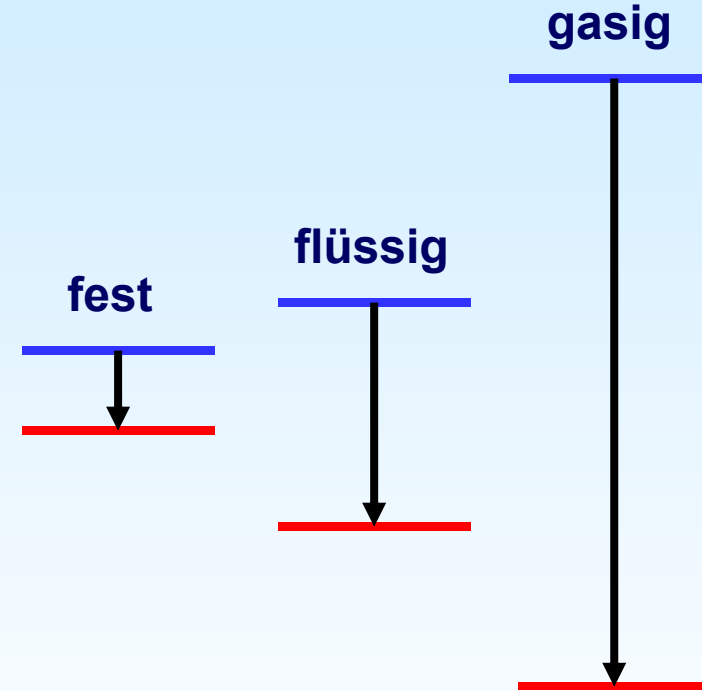
Anwendungsbeispiel: Schmelzen, Verdampfen

In der Kälte sind (fast) alle Stoffe fest,
weil $\mu(B|s) < \mu(B|l) \ll \mu(B|g)$.

Wegen

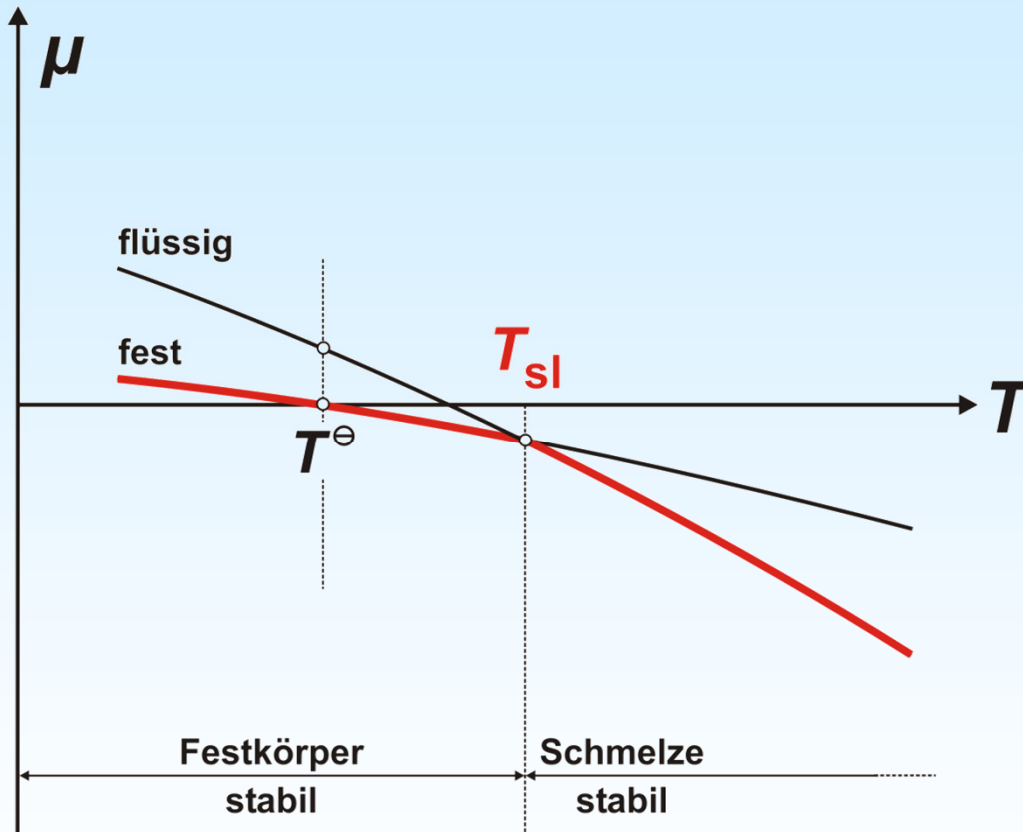
$$\alpha(B|g) \ll \alpha(B|l) < \alpha(B|s) < 0$$

sinken alle Potenziale beim Erwärmen
und man kann erwarten, dass sich die
Reihenfolge irgendwann umkehrt und
damit alle Stoffe schmelzen und
schließlich verdampfen.



Wenn die μ - und α -Werte bekannt sind, lassen sich Schmelz-, Siede-
oder Sublimationspunkte berechnen, aber auch Zersetzung-
temperaturen etc.

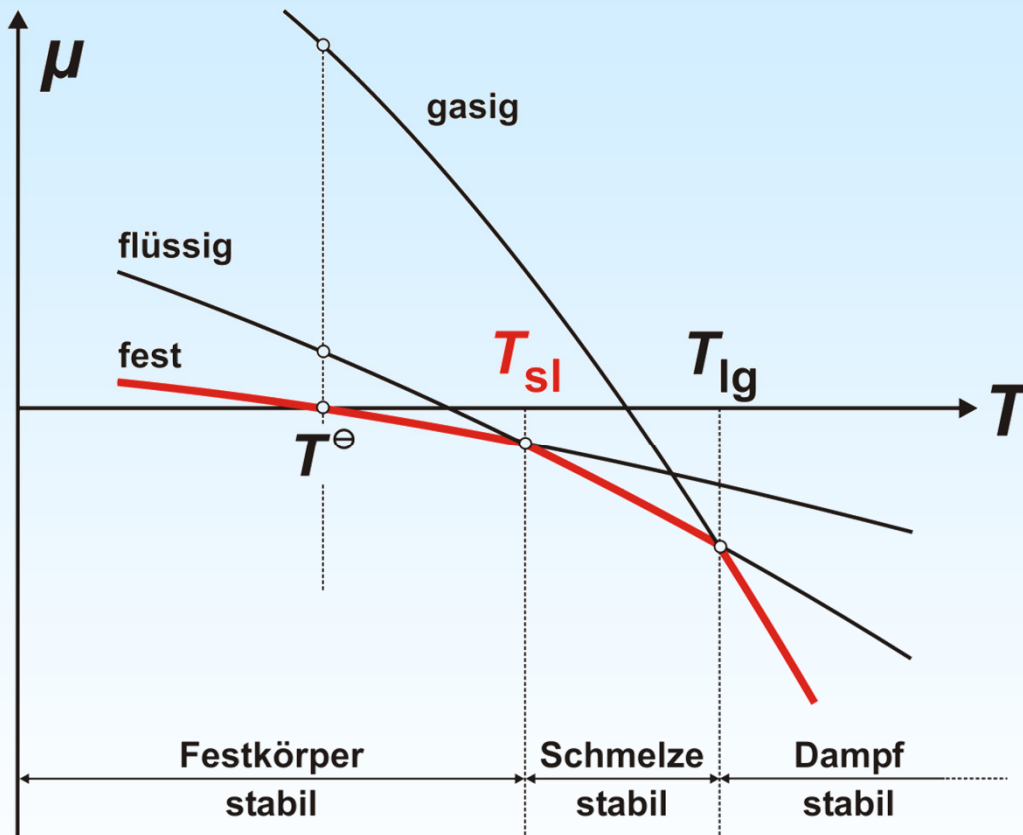
Schmelz- und Siedepunkte



Beim Erwärmen sinken die chemischen Potenziale, und zwar im flüssigen Zustand schneller als im festen (da $\alpha(\text{B}|l) < \alpha(\text{B}|s) < 0$).

⇒ Die Kurven schneiden sich bei der **Schmelztemperatur T_{sl}** .

Schmelz- und Siedepunkte



Bestimmung von T_{sl} :
Gleichgewichtszustand:

$$\mu_s = \mu_l$$

Linearer Ansatz:

$$\mu_{s,0} + \alpha_s(T_{sl} - T_0) = \mu_{l,0} + \alpha_l(T_{sl} - T_0)$$

Auflösen nach T_{sl} :

$$T_{sl} = T_0 - \frac{\mu_{s,0} - \mu_{l,0}}{\alpha_s - \alpha_l}$$

z.B. Pb: $T_{sl} \approx 620 \text{ K}$

Beim Erwärmen sinken die chemischen Potenziale, und zwar im flüssigen Zustand schneller als im festen (da $0 > \alpha(B|s) > \alpha(B|l)$).

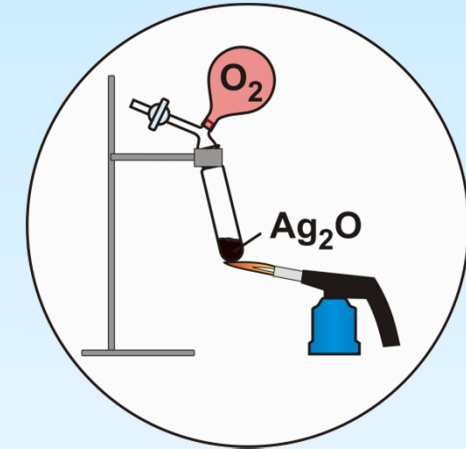
⇒ Die Kurven schneiden sich bei der **Schmelztemperatur T_{sl}** .

4

Glühen von Silberoxid

Versuchsdurchführung:

Schwarzbraunes Silberoxid wird mäßig mit einem Brenner erhitzt.



4

Glühen von Silberoxid



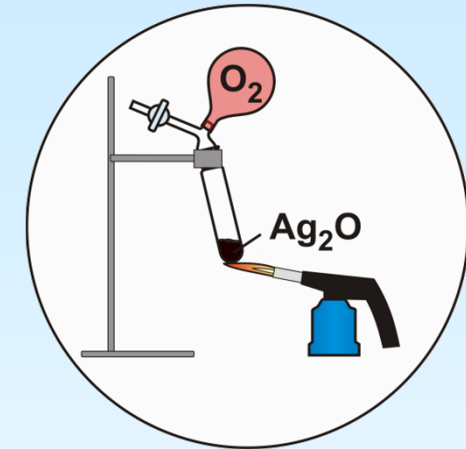
Versuchsdurchführung:

Schwarzbraunes Silberoxid wird mäßig mit einem Brenner erhitzt.

Beobachtung:

Das entstehende Gas kann mit der Glimmprobe als Sauerstoff identifiziert werden.

Im Reagenzglas bleibt weißliches Silbermetall zurück.



Erklärung:

Die Zersetzung von Silberoxid wird beschrieben durch:



μ^\ominus/kG	$2 \cdot (-11)$	$< 4 \cdot 0$	$+ 0$	\Rightarrow	Reaktion nicht möglich!
$\alpha/\text{G} \cdot \text{K}^{-1}$	$2 \cdot (-121)$	$4 \cdot (-43)$	-205		

Auf Grund des stark negativen Temperaturkoeffizienten α des Gases O_2 wird der Vorgang durch eine Temperaturerhöhung begünstigt.

Einfluss des Druckes

Wegen

$$0 < \beta(B|s) < \beta(B|l) \lll \beta(B|g)$$

lässt eine Druckerhöhung das chemische Potenzial wachsen. Je höher der Druck ist, desto stabiler wird in der Regel der feste Zustand gegenüber den anderen. Umgekehrt führt eine Druckerniedrigung zur Bevorzugung des gasigen Zustandes.

5



Sieden durch Kühlen

Versuchsdurchführung:

Der mit warmem Wasser gefüllte Rundkolben wird mit Eiswasser übergossen.

Beobachtung:

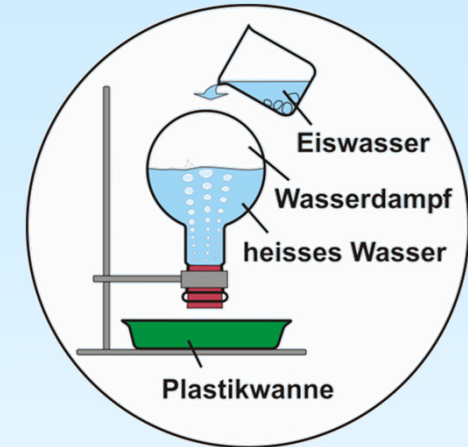
Das Wasser beginnt zu sieden.

Erklärung:

Der Siedeprozess wird beschrieben durch



μ^\ominus/kG	-237	< -229	➡ Vorgang nicht möglich!
$\beta/G \cdot Pa^{-1}$	$18,1 \cdot 10^{-6}$	$24465 \cdot 10^{-6}$	



Das chemische Potenzial von Gasen und damit auch von Wasserdampf ist stark druckabhängig (β sehr groß). Bei hinreichend kleinem Druck gilt daher bereits bei 298 K: $\mu(\text{Wasserdampf}) < \mu(\text{Wasser})$.

Zustandsdiagramm

Eine gleichzeitige Druck- und Temperaturabhängigkeit wird beschrieben durch

$$\mu = \mu_0 + \alpha \cdot (T - T_0) + \beta \cdot (p - p_0)$$

Damit kann das *Zustandsdiagramm* eines Stoffes berechnet werden, wenn der Phasenübergang als Reaktion formuliert und die Gleichgewichtsbedingung berücksichtigt wird, z.B. Schmelzvorgang:

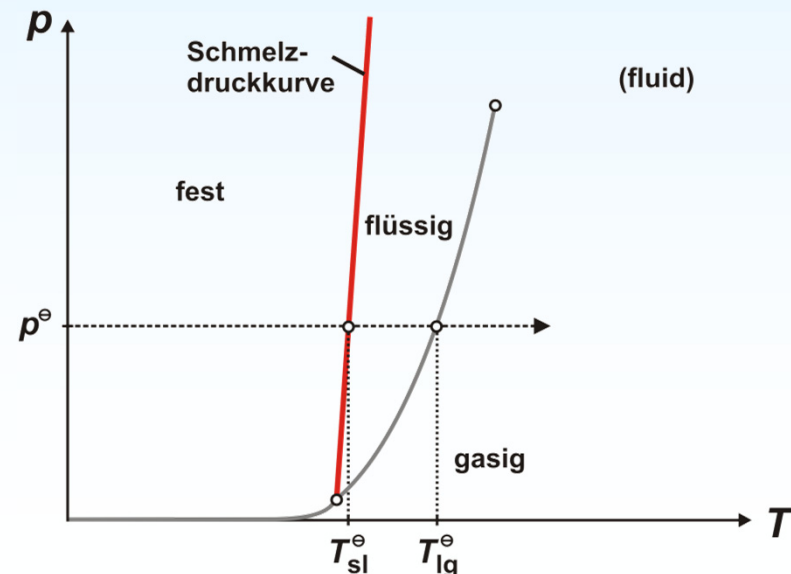
$$B|s \rightarrow B|l \quad \mu_s = \mu_l$$

Berechnung der Schmelzdruckkurve:

$$\begin{aligned} \mu_{s,0} + \alpha_s \cdot (T - T_0) + \beta_s \cdot (p - p_0) = \\ \mu_{l,0} + \alpha_l \cdot (T - T_0) + \beta_l \cdot (p - p_0) \end{aligned}$$



$$p = p_0 - \frac{\mu_{s,0} - \mu_{l,0}}{\beta_s - \beta_l} - \frac{\alpha_s - \alpha_l}{\beta_s - \beta_l} (T - T_0)$$

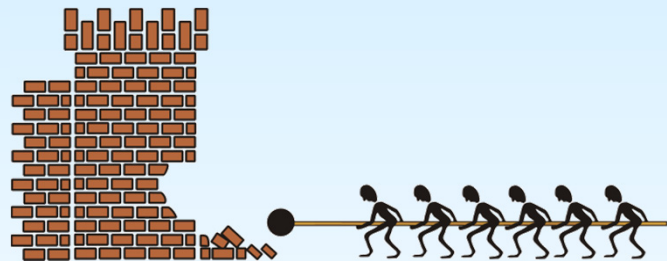


6. Massenwirkung – eine Frage des Umfeldes



Massenwirkung

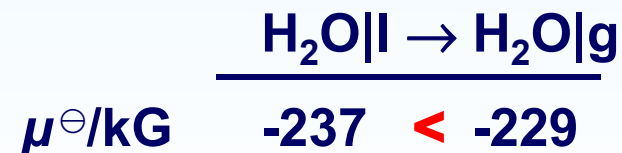
Der Umbildungstrieb μ der Stoffe hängt nicht nur von ihrer *Art* ab, sondern auch von ihren *Mengen* n oder genauer gesagt von ihren *Konzentrationen* c ($= n/V$).



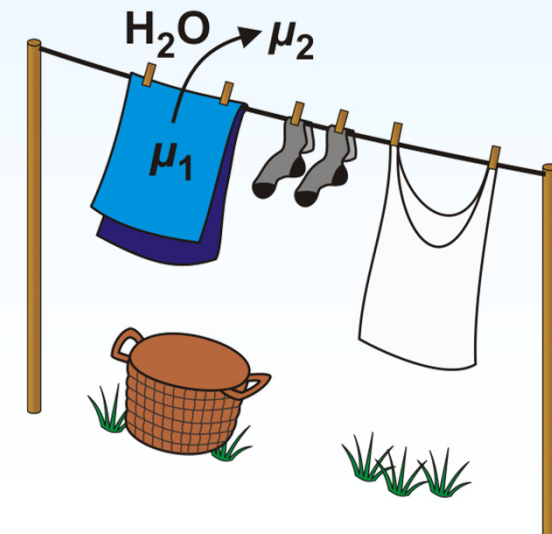
Je geballter der Einsatz, desto durchschlagender die Wirkung.

Für die Massenwirkung ist nicht die *Masse* eines Stoffes maßgeblich, sondern seine „*Massierung*“ im Raum, nicht die *Menge*, sondern die *Konzentration*.

Beispiel: *Verdunstung* von Wasser



Die starke Verdünnung des Wasserdampfes mit Luft senkt den Wert des Potentials unter den von flüssigem Wasser.



Konzentrationsabhängigkeit

Wählt man die Konzentrationsänderung ($c - c_0$) hinreichend klein, ist auch hier ein linearer Ansatz ausreichend:

$$\mu = \mu_0 + \gamma \cdot (c - c_0)$$

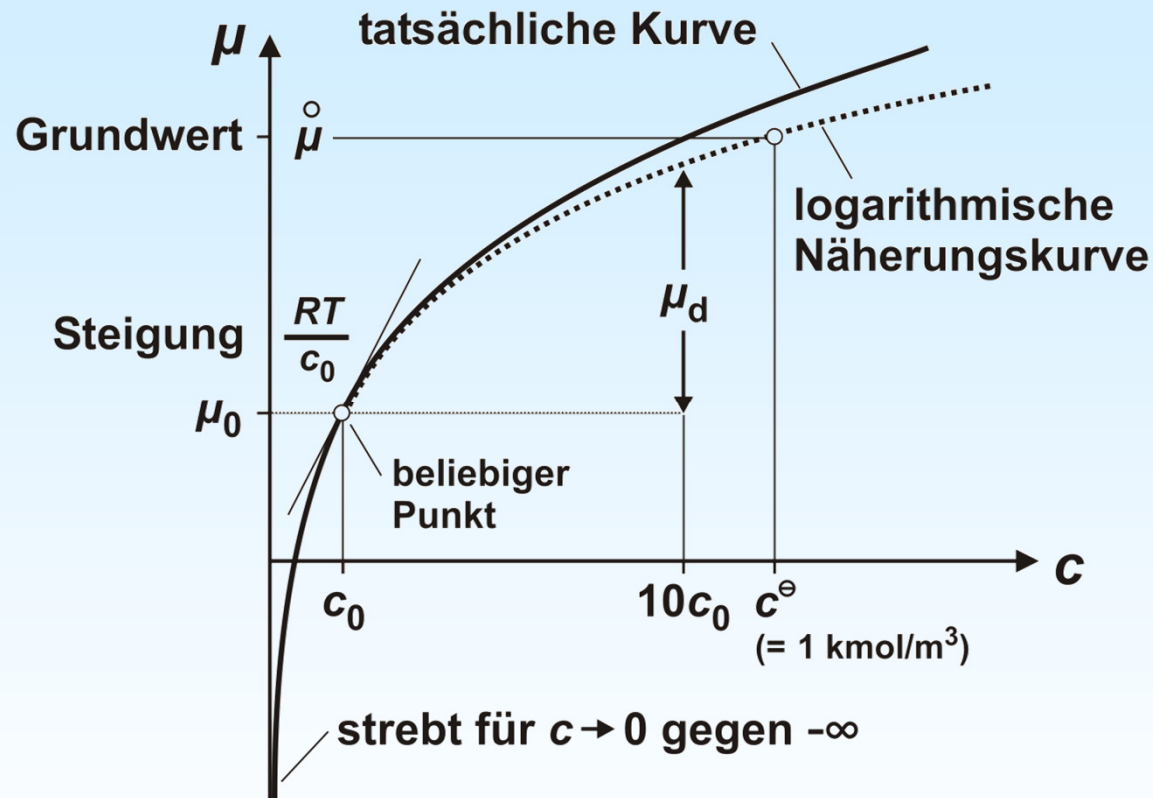
Während α und β noch von Art und Umfeld des Stoffes abhängen, ist der *Konzentrationskoeffizient* γ eine *universelle Größe*, d.h. für alle Stoffe in jedem Umfeld gleich:

$$\gamma = \frac{RT}{c} \quad \text{für kleine } c$$

Die Kombination dieser beiden Beziehungen führt zu:

$$\mu = \mu_0 + RT \ln(c / c_0) = \mu_0 + RT \ln c_r \quad \text{Massenwirkungsgleichung}$$

Konzentrationsabhängigkeit



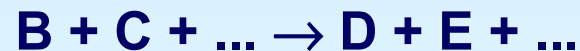
Der Grundwert des chemischen Potentials des gelösten Stoffes (d.h. der Wert für die Normkonzentration $c^\ominus = 1 \text{ kmol/m}^3$) liegt nicht auf der gemessenen, sondern auf der logarithmischen Näherungskurve!

Fällt die Konzentration c eines Stoffes auf 1/10 des Ausgangswertes, dann sinkt sein chemisches Potenzial stets um denselben Betrag, das sog. „*Dekapotenzial*“ μ_d (5,71 kG \approx 6 kG bei 298 K).

Massenwirkungsgesetz

Eine sehr wichtige Anwendung ist die Herleitung des „*Massenwirkungsgesetzes*“.

Bei einer allgemeinen Reaktion



ist das Gleichgewicht erreicht, wenn das Potenzialgefälle verschwindet, d.h.

$$\mu_B + \mu_C + \dots = \mu_D + \mu_E + \dots$$

Anwendung der Massenwirkungsgleichung (für kleine c):

$$\overset{\circ}{\mu}_B + RT \ln c_r(B) + \overset{\circ}{\mu}_C + RT \ln c_r(C) + \dots = \overset{\circ}{\mu}_D + RT \ln c_r(D) + \overset{\circ}{\mu}_E + RT \ln c_r(E) + \dots$$

Umformung:

$$\frac{c_r(D) \cdot c_r(E) \cdot \dots}{c_r(B) \cdot c_r(C) \cdot \dots} = \exp\left(\frac{\overset{\circ}{\mu}_B + \overset{\circ}{\mu}_C + \dots - \overset{\circ}{\mu}_D - \overset{\circ}{\mu}_E - \dots}{RT}\right) = \overset{\circ}{K}_c$$

Gleichgewichtszahl

6

Fe³⁺-SCN⁻-Gleichgewicht

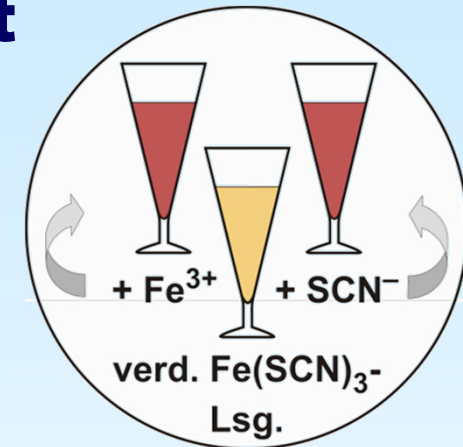


Versuchsdurchführung:

Eine bernsteingelbe verdünnte Eisenthio-
cyanat-Lösung wird alternativ mit Fe³⁺-
oder SCN⁻-Lösung versetzt.

Beobachtung:

Die Lösung färbt sich in beiden Fällen rot.



Erklärung:

Das Gleichgewicht wird beschrieben durch

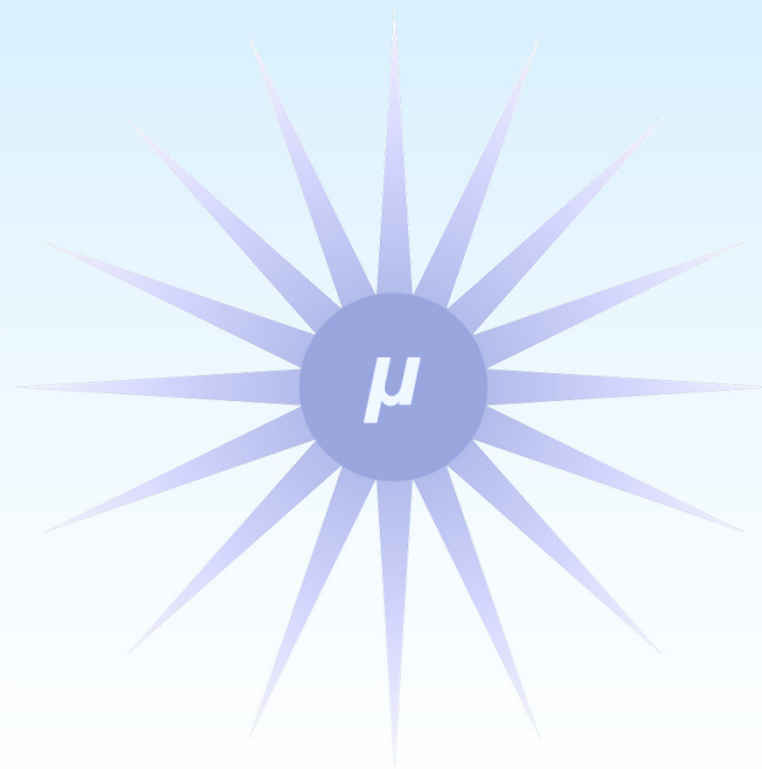


das MWG lautet:

$$K_c = \frac{c([\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{SCN})_3])}{c([\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}) \cdot c(\text{SCN}^-)^3}$$

Die Zugabe von Wasser zur Eisenthio-
cyanatlösung verschiebt das
Gleichgewicht auf die Eduktseite, von Fe³⁺- oder SCN⁻-Lösung zur
verdünnten Lösung wieder auf die Produktseite.

7. Begleitender Energieumsatz



Begleitender Energieumsatz

Die *Bildung* eines Stoffes gegen seinen „Umbildungstrieb“ μ erfordert die Energie W_B . Diese Energie ist um so höher,

- je größer die neu gebildete Stoffmenge Δn ,
- je größer die „Gegenkraft“ μ ist:



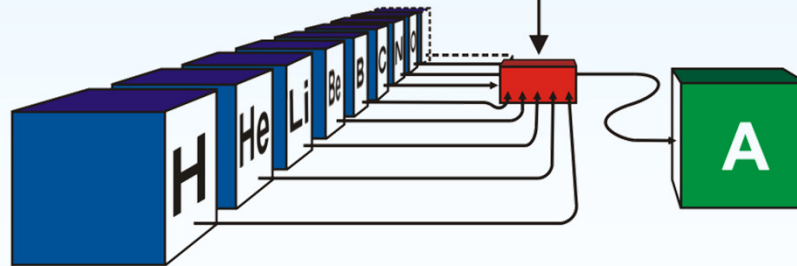
$$W_B = \mu \cdot \Delta n$$

für kleine Δn

Reine Elemente
in fest gewähltem Bezugs-
zustand (298 K, 101 kPa)

Reaktor Stoff A
in frei gewähltem
Zustand (T, p, c, \dots)

Theoretisch denkbare
Messanordnung zur
Bestimmung von μ -
Werten



Maß für μ_A : Energie W_B , die zur Bildung von 1 mol des Stoffes A benötigt wird

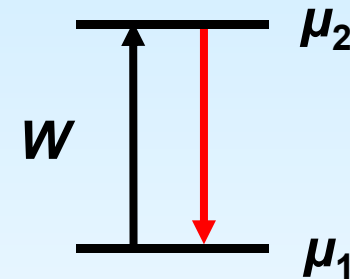
$$\mu_A = W_B / n_A$$

Einheit: J/mol = G

Begleitender Energieumsatz

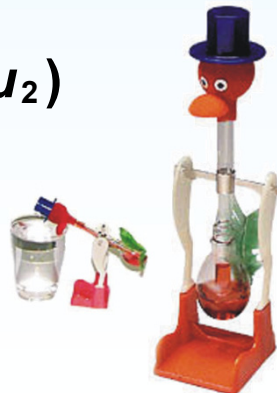
Analog wird die Energie zur *Übertragung* einer Menge n eines Stoffes von einem niedrigen Potenzial μ_1 zu einem hohen Potenzial μ_2 beschrieben durch:

$$W_{\dot{U}} = \Delta\mu \cdot n$$



Umgekehrt ist beim Übergang eines Stoffes von einem hohen (μ_2) zu einem niedrigen Potenzial μ_1 Energie gewinnbar ($W < 0$). Diese Energie kann genutzt werden (vergl. Wassermühlen oder Dampfmaschinen).

$$W = n(\mu_1 - \mu_2)$$



$$W = S(T_1 - T_2)$$



$$W = m(\psi_1 - \psi_2)$$

mit $\psi = g \cdot h$



7

Trinkende Ente

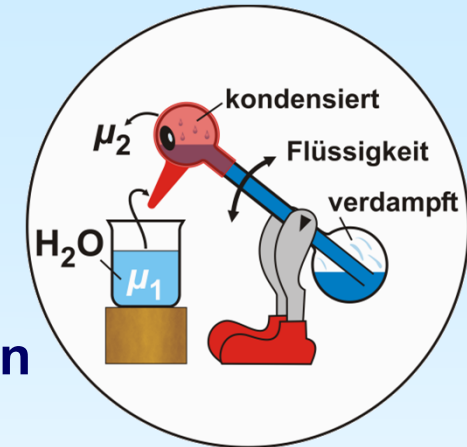


Versuchsdurchführung:

Der Kopffilz der Ente wird befeuchtet.

Beobachtung:

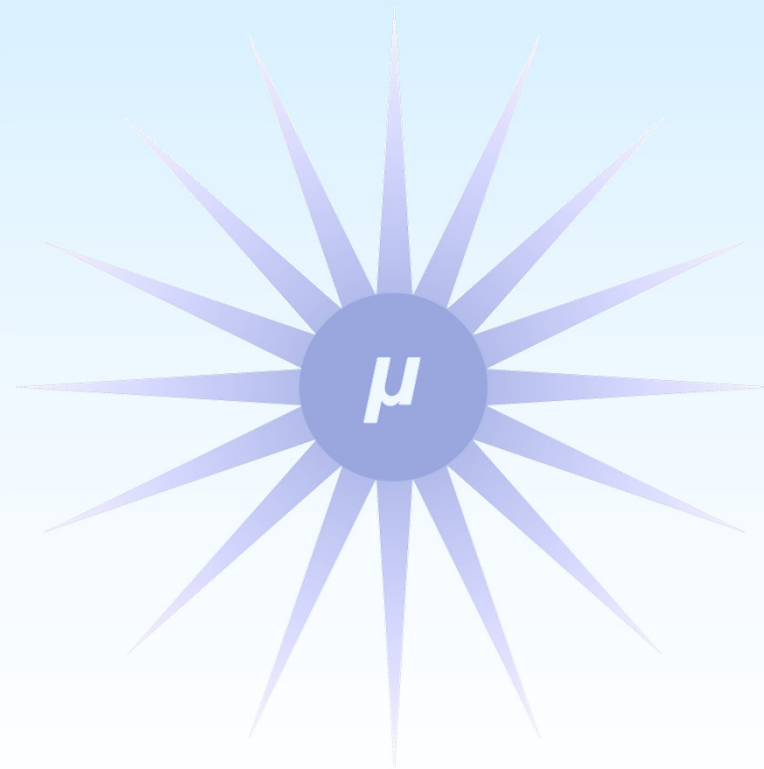
Die Ente beginnt in periodischen Abständen zu trinken.

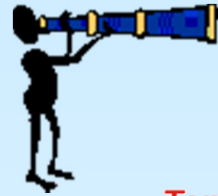


Erklärung:

Die „trinkende Ente“ ist eine *Stoffkraftmaschine*, die die chemische Potenzialdifferenz zwischen flüssigem Wasser und dem Wasserdampf in der Luft ausnutzt. Durch Entzug der Verdampfungswärme kühlt sich der Kopf ab, so dass ein Teil des Dampfes der Füllflüssigkeit kondensiert. Zum Ausgleich des Unterdrucks steigt Flüssigkeit durch das Steigrohr in den Kopf. Beim „Trinken“ gleicht sich der Dampfdruck wieder aus. Mit Hilfe einer entsprechenden Konstruktion ist die Ente in der Lage, Arbeit zu verrichten.

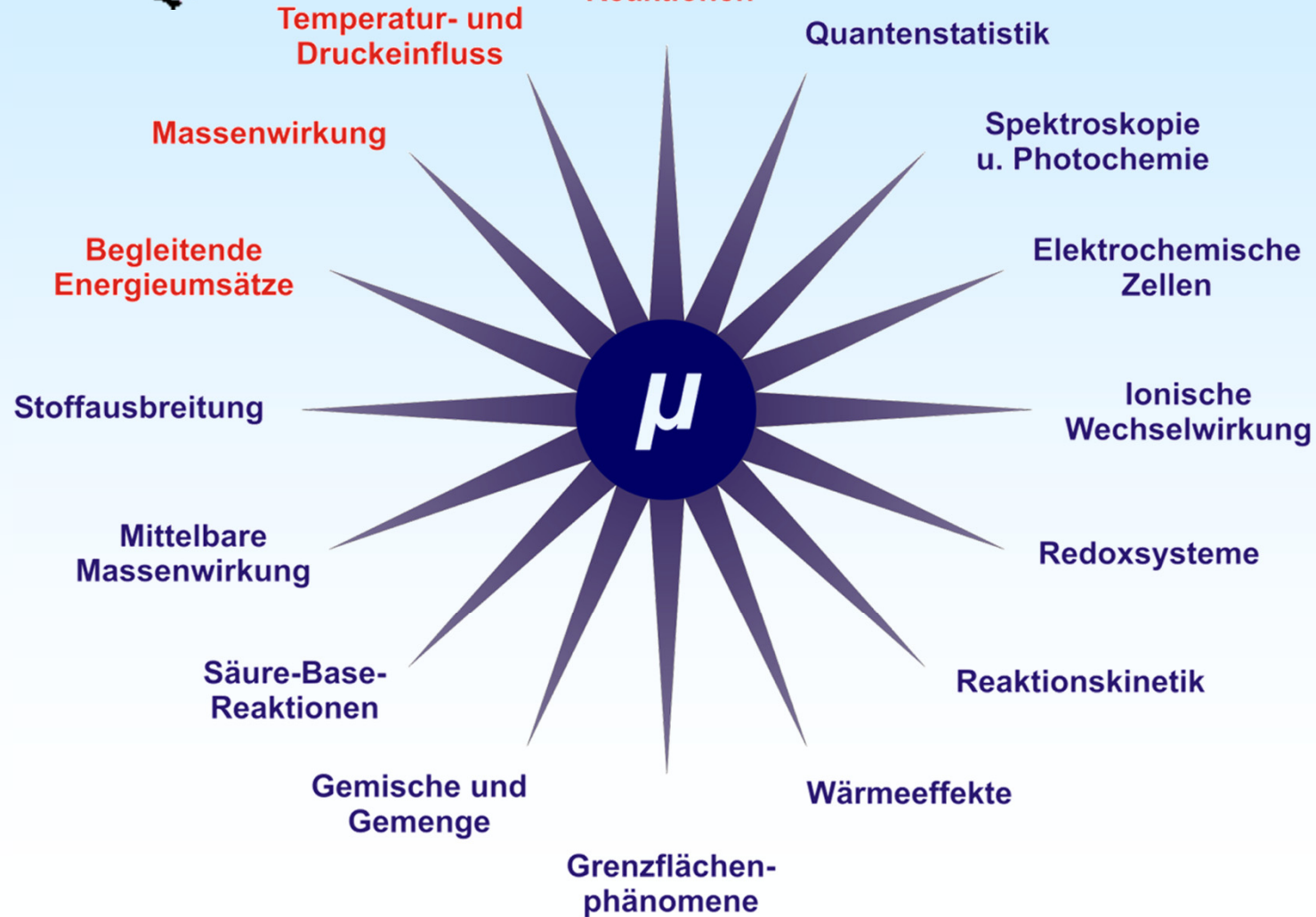
8. Ausblick

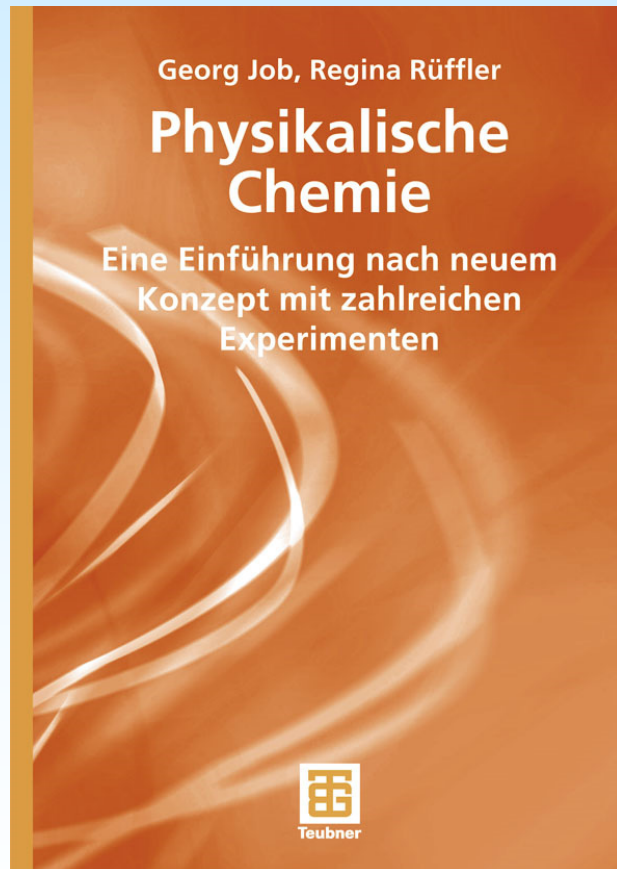




Ausblick

Vorhersage von Reaktionen





Georg Job, Regina Ruffler

Physikalische Chemie

**Eine Einführung nach neuem Konzept
mit zahlreichen Experimenten**

Studienbücher Chemie

Vieweg+Teubner Verlag

Erscheinungstermin: SS 09

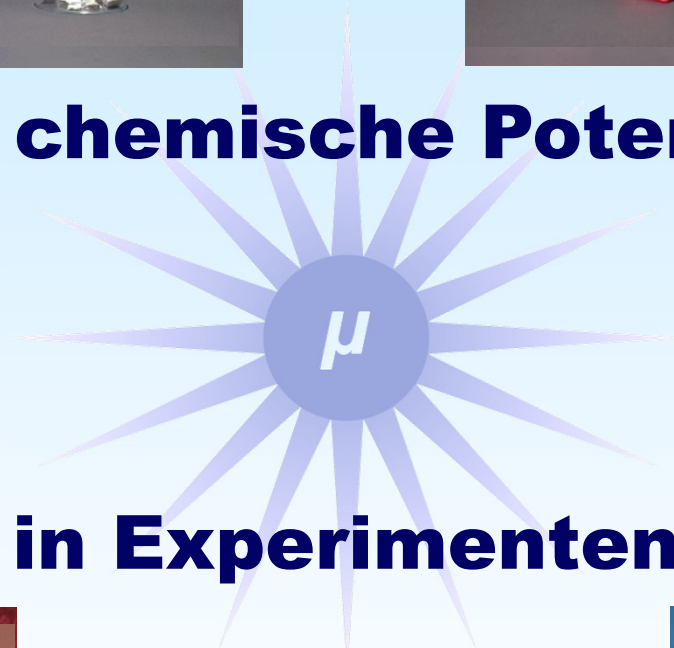
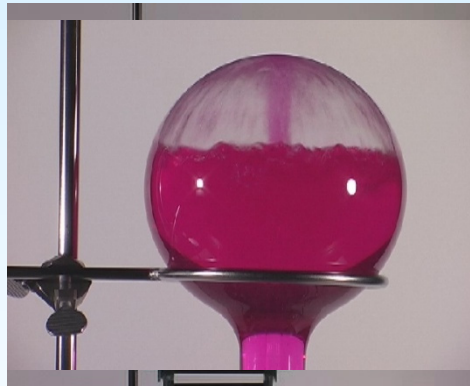


**Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit.**

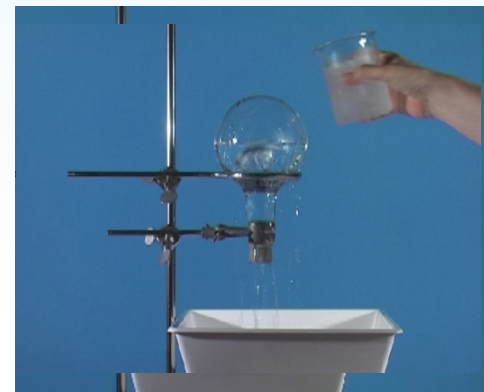
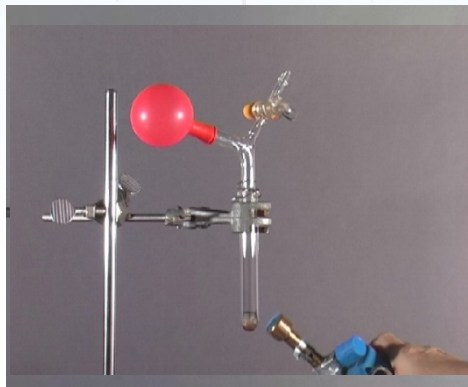
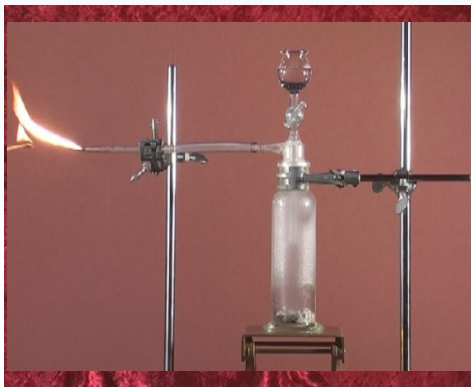
Weitere Informationen: www.job-stiftung.de



Das chemische Potenzial



in Experimenten



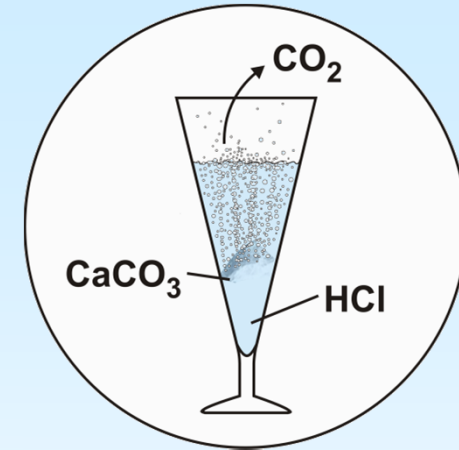
1



Auflösen von Marmor

Versuchsdurchführung:

Marmorstücke werden in Salzsäure geworfen.



1

Auflösen von Marmor

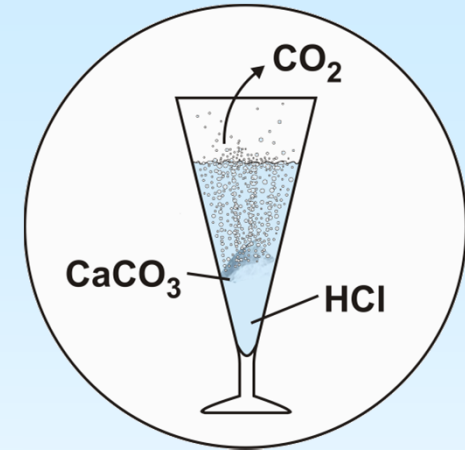


Versuchsdurchführung:

Marmorstücke werden in Salzsäure geworfen.

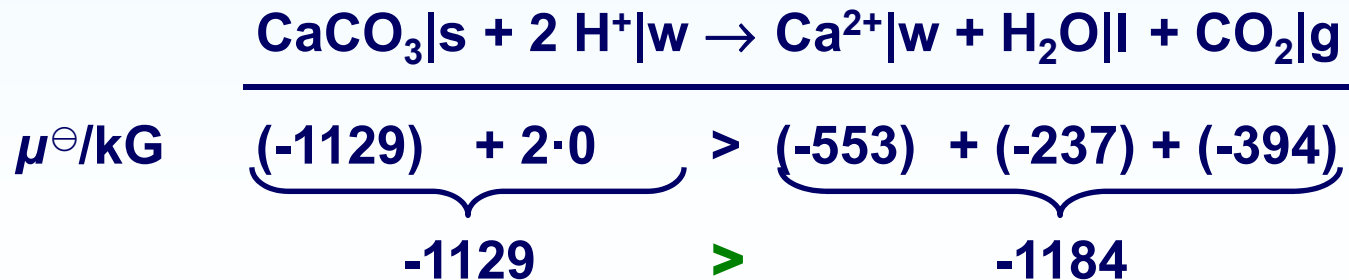
Beobachtung:

Es tritt eine lebhafte Gasentwicklung auf.

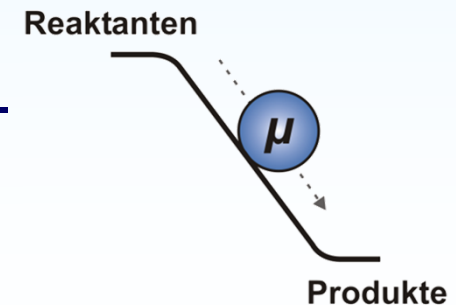


Erklärung:

Calciumcarbonat wird von Salzsäure unter Entwicklung von gasförmigem Kohlendioxid aufgelöst gemäß:



Reaktion möglich!



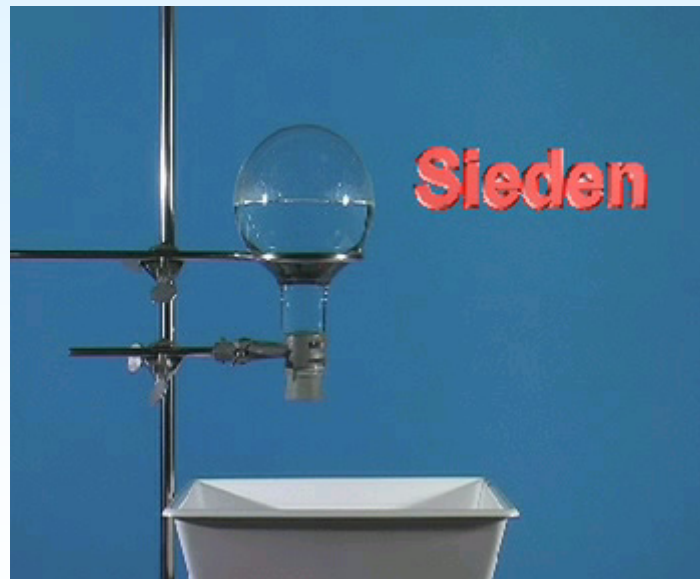
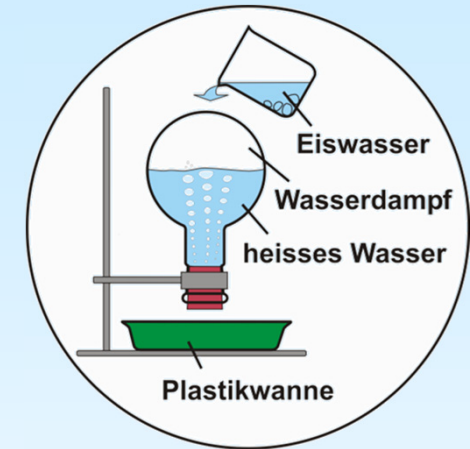
5



Sieden durch Kühlen

Versuchsdurchführung:

Der mit warmem Wasser gefüllte Rundkolben wird mit Eiswasser übergossen.



5



Sieden durch Kühlen

Versuchsdurchführung:

Der mit warmem Wasser gefüllte Rundkolben wird mit Eiswasser übergossen.

Beobachtung:

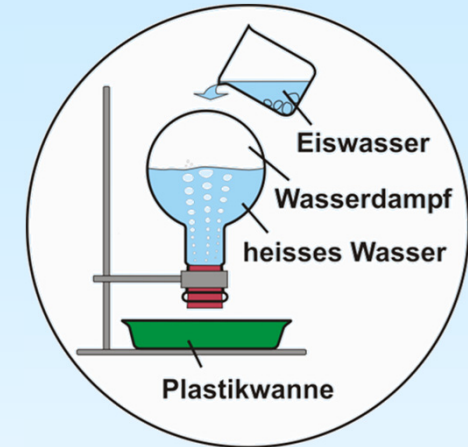
Das Wasser beginnt zu sieden.

Erklärung:

Der Siedeprozess wird beschrieben durch



μ^\ominus/kG	-237	< -229	➡ Vorgang nicht möglich!
$\beta/G \cdot Pa^{-1}$	$18,1 \cdot 10^{-6}$	$24465 \cdot 10^{-6}$	



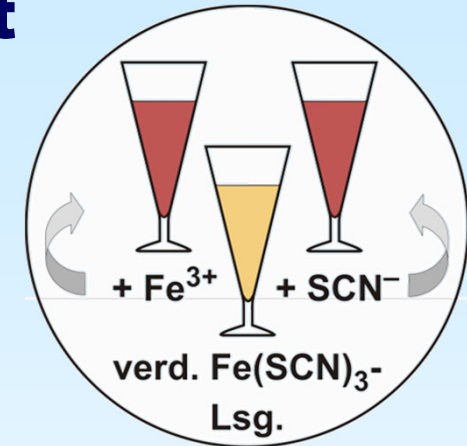
Das chemische Potenzial von Gasen und damit auch von Wasserdampf ist stark druckabhängig (β sehr groß). Bei hinreichend kleinem Druck gilt daher bereits bei 298 K: $\mu(\text{Wasserdampf}) < \mu(\text{Wasser})$.

6

Fe^{3+} - SCN^- -Gleichgewicht

Versuchsdurchführung:

Eine bernsteingelbe verdünnte Eisenthio-
cyanat-Lösung wird alternativ mit Fe^{3+} -
oder SCN^- -Lösung versetzt.



6

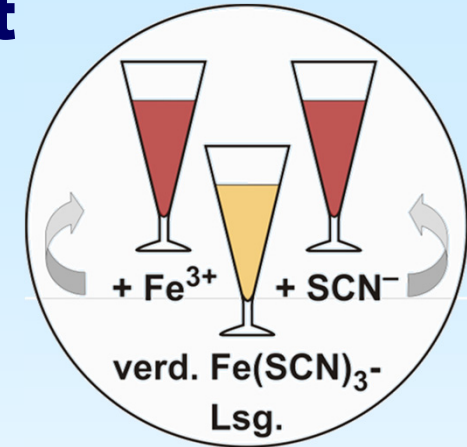
Fe³⁺-SCN⁻-Gleichgewicht

Versuchsdurchführung:

Eine bernsteingelbe verdünnte Eisenthio-
cyanat-Lösung wird alternativ mit Fe³⁺-
oder SCN⁻-Lösung versetzt.

Beobachtung:

Die Lösung färbt sich in beiden Fällen rot.



Erklärung:

Das Gleichgewicht wird beschrieben durch



das MWG lautet:

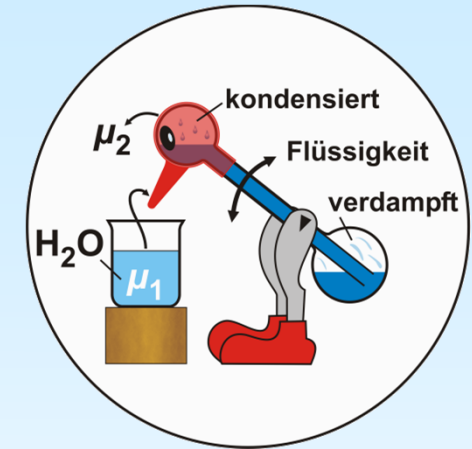
$$K_c = \frac{c([\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{SCN})_3])}{c([\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}) \cdot c(\text{SCN}^-)^3}$$

Die Zugabe von Wasser zur Eisenthio-
cyanatlösung verschiebt das
Gleichgewicht auf die Eduktseite, von Fe³⁺- oder SCN⁻-Lösung zur
verdünnten Lösung wieder auf die Produktseite.

7

Trinkende Ente

Versuchsdurchführung:
Der Kopffilz der Ente wird befeuchtet.



7

Trinkende Ente

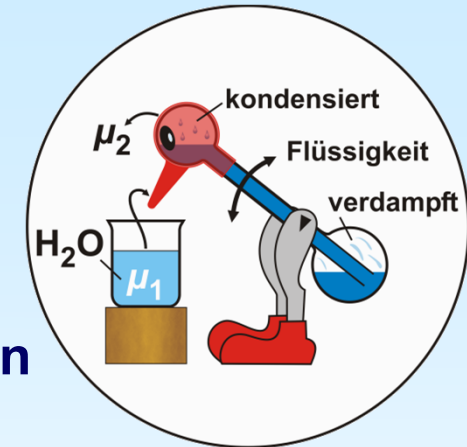


Versuchsdurchführung:

Der Kopffilz der Ente wird befeuchtet.

Beobachtung:

Die Ente beginnt in periodischen Abständen zu trinken.



Erklärung:

Die „trinkende Ente“ ist eine *Stoffkraftmaschine*, die die chemische Potenzialdifferenz zwischen flüssigem Wasser und dem Wasserdampf in der Luft ausnutzt. Durch Entzug der Verdampfungswärme kühlt sich der Kopf ab, so dass ein Teil des Dampfes der Füllflüssigkeit kondensiert. Zum Ausgleich des Unterdrucks steigt Flüssigkeit durch das Steigrohr in den Kopf. Beim „Trinken“ gleicht sich der Dampfdruck wieder aus. Mit Hilfe einer entsprechenden Konstruktion ist die Ente in der Lage, Arbeit zu verrichten.