

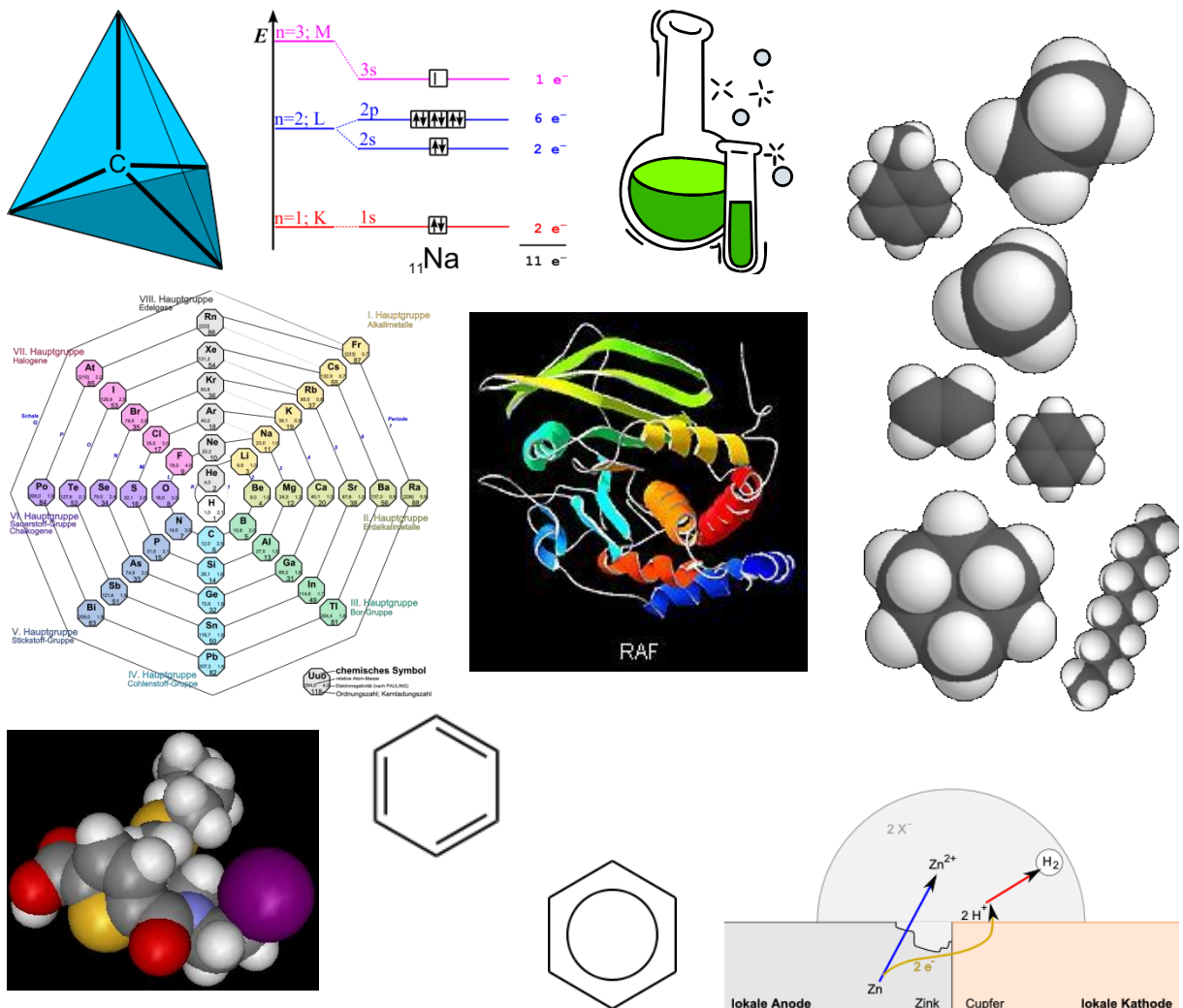
# Allgemeine Chemie

## mit besonderen Bezügen zur Biologie und Ernährungslehre

### in der Sekundarstufe II

### Teil 3a: chemische Reaktion, allgemein

Autor: L. Drews

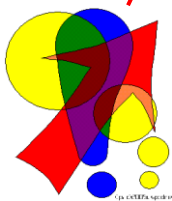


Bilder-Quellen (z.T. nachbearb.): commons.wikimedia.org (Algarech + Van Flamm); UD-Bildschirmshoner; ..., lsp: dre

Version 0.41 (2022) teilredigierte Arbeitsversion!!!

**Legende:**

mit diesem Symbol werden zusätzliche Hinweise, Tips und weiterführende Ideen gekennzeichnet

**Nutzungsbestimmungen / Bemerkungen zur Verwendung durch Dritte:**

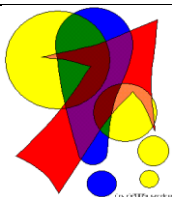
- (1) Dieses Skript (Werk) ist zur freien Nutzung in der angebotenen Form durch den Anbieter (lern-soft-projekt) bereitgestellt. Es kann unter Angabe der Quelle und / oder des Verfassers gedruckt, vervielfältigt oder in elektronischer Form veröffentlicht werden.
- (2) Das Weglassen von Abschnitten oder Teilen (z.B. Aufgaben und Lösungen) in Teildrucken ist möglich und sinnvoll (Konzentration auf die eigenen Unterrichtsziele, -inhalte und -methoden). Bei angemessen großen Auszügen gehören das vollständige Inhaltsverzeichnis und die Angabe einer Bezugsquelle für das Originalwerk zum Pflichtteil.
- (3) Ein Verkauf in jedweder Form ist ausgeschlossen. Der Aufwand für Kopierleistungen, Datenträger oder den (einfachen) Download usw. ist davon unberührt.
- (4) Änderungswünsche werden gerne entgegen genommen. Ergänzungen, Arbeitsblätter, Aufgaben und Lösungen mit eigener Autorenschaft sind möglich und werden bei konzeptioneller Passung eingearbeitet. Die Teile sind entsprechend der Autorenschaft zu kennzeichnen. Jedes Teil behält die Urheberrechte seiner Autorenschaft bei.
- (5) Zusammenstellungen, die von diesem Skript – über Zitate hinausgehende – Bestandteile enthalten, müssen verpflichtend wieder gleichwertigen Nutzungsbestimmungen unterliegen.
- (6) Diese Nutzungsbestimmungen gehören zu diesem Werk.
- (7) Der Autor behält sich das Recht vor, diese Bestimmungen zu ändern.
- (8) Andere Urheberrechte bleiben von diesen Bestimmungen unberührt.

**Rechte Anderer:**

Viele der verwendeten Bilder unterliegen verschiedensten freien Lizenzen. Nach meinen Recherchen sollten alle genutzten Bilder zu einer der nachfolgenden freien Lizenzen gehören. Unabhängig von den Vorgaben der einzelnen Lizenzen sind zu jedem extern entstandenen Objekt die Quelle, und wenn bekannt, der Autor / Rechteinhaber angegeben.

|                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>public domain</b> (pd)                                                                                          | Zum Gemeingut erklärte Graphiken oder Fotos (u.a.). Viele der verwendeten Bilder entstammen Webseiten / Quellen US-amerikanischer Einrichtungen, die im Regierungsauftrag mit öffentlichen Mitteln finanziert wurden und darüber rechtlich (USA) zum Gemeingut wurden. Andere kreative Leistungen wurden ohne Einschränkungen von den Urhebern freigegeben.                                                                                                                                                                                         |
| <b>gnu free document licence</b> (GFDL; gnu fdl)                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>creativecommons</b> (cc)<br> |  od. neu  ... Namensnennung<br> ... nichtkommerziell<br> ... in der gleichen Form<br> ... unter gleichen Bedingungen |

Die meisten verwendeten Lizenzen schließen eine kommerzielle (Weiter-)Nutzung aus!

**Bemerkungen zur Rechtschreibung:**

Dieses Skript folgt nicht zwangsläufig der neuen **ODER** alten deutschen Rechtschreibung. Vielmehr wird vom Recht auf künstlerische Freiheit, der Freiheit der Sprache und von der Autokorrektur des Textverarbeitungsprogramms microsoft® WORD® Gebrauch gemacht.

Für Hinweise auf echte Fehler ist der Autor immer dankbar.

---

## Inhaltsverzeichnis:

|                                                                                                                                 | Seite      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5. chemische Reaktion</b> .....                                                                                              | <b>5</b>   |
| <b>5.0. erste allgemeine und wiederholende Betrachtungen</b> .....                                                              | <b>5</b>   |
| <i>Modifikations-Umwandlungen - Grenzfälle chemischer Reaktionen</i> .....                                                      | <b>18</b>  |
| <i>Experimente zum Thema: Chemische Reaktion / physikalischer Vorgang</i> .....                                                 | <b>18</b>  |
| <b>5.1. Teilchen- und Stoß-Theorie der chemischen Reaktion</b> .....                                                            | <b>22</b>  |
| <b>5.1.1. die Stoß-Theorie</b> .....                                                                                            | <b>22</b>  |
| 5.1.1.1. Arten von Teilchen-Zusammenstößen .....                                                                                | 23         |
| 5.1.1.2. Wahrscheinlichkeit von Stößen in Abhängigkeit von der Teilchen-Anzahl ...                                              | 25         |
| 5.1.1.3. Wahrscheinlichkeit von Stößen in Abhängigkeit vom verfügbaren Raum ....                                                | 26         |
| <b>5.1.2. die Theorie des Übergangszustandes</b> .....                                                                          | <b>27</b>  |
| <b>5.1.3. der typische Reaktions-Ablauf</b> .....                                                                               | <b>29</b>  |
| (Kombination der Stoß-Theorie mit der Theorie des Übergangs-Zustandes) .....                                                    | 29         |
| der einfache Zusammenstoß .....                                                                                                 | 29         |
| der effektive Zusammenstoß .....                                                                                                | 29         |
| <b>5.2. die Thermodynamik chemischer Reaktionen</b> .....                                                                       | <b>31</b>  |
| <b>5.2.0. Grundlagen / Wiederholung aus der Physik</b> .....                                                                    | <b>33</b>  |
| 5.2.0.1. Energie als zentrale Größe in der Thermodynamik .....                                                                  | 34         |
| <b>5.2.1. einfache Thermodynamik chemischer Reaktionen</b> .....                                                                | <b>40</b>  |
| Reaktionen mit isochorer Prozess-Führung .....                                                                                  | 42         |
| kleines Praktikum mit Kälte-Pack's / Kälte-Komprexe / Kühl-Pack .....                                                           | 46         |
| kleines Praktikum mit Wärme-Kissen / Taschenwärmer .....                                                                        | 47         |
| Reaktionen mit isobarer Prozess-Führung .....                                                                                   | 48         |
| ZURÜCK ZU: Reaktions-Enthalpie in isochoren Systemen .....                                                                      | 56         |
| Standardisierung der Enthalpie .....                                                                                            | 58         |
| spezielle Enthalpien .....                                                                                                      | 60         |
| Energie-Veränderungen während einer Reaktion .....                                                                              | 65         |
| <b>5.2.2. weiterführende Thermodynamik chemischer Reaktionen</b> .....                                                          | <b>69</b>  |
| 5.2.2.x. Ermittlung und Berechnung von Reaktions-Enthalpien .....                                                               | 70         |
| Wärme-Kapazität .....                                                                                                           | 72         |
| Wärme-Kapazität eines Kalorimeter's .....                                                                                       | 73         |
| Satz von HESS .....                                                                                                             | 76         |
| Kann eine endotherme Reaktion auch freiwillig ablaufen? .....                                                                   | 82         |
| die Entropie – das Maß für die Unordnung .....                                                                                  | 88         |
| Wie ändert sich die Entropie beim Erwärmen eines Stoff's? .....                                                                 | 91         |
| die GIBBS-HELMHOLTZ-Gleichung .....                                                                                             | 94         |
| Temperatur-Abhängigkeit der freien Enthalpie, der inneren Energie und des<br>Entropie-Ausdruck's für die Aggregatzustände ..... | 97         |
| Freie Enthalpie oder Welche Reaktionen laufen nun wann freiwillig? .....                                                        | 99         |
| Formeln und Kennwerte der Thermodynamik (Auszug aus dem Tafelwerk) .....                                                        | 114        |
| <b>5.2.3. Katalyse</b> .....                                                                                                    | <b>116</b> |
| 5.2.3.1. homogene Katalysen .....                                                                                               | 119        |
| 5.2.3.2. heterogene Katalysen .....                                                                                             | 120        |
| LANGMUIR-HINSHELWOOD-Mechanismus .....                                                                                          | 121        |
| RIDEAL-ELEY-Mechanismus .....                                                                                                   | 121        |
| 5.2.3.3. Autokatalyse .....                                                                                                     | 122        |
| 5.2.3.4. Bio-Katalysen – Enzyme als Katalysatoren .....                                                                         | 123        |
| <b>5.3. die Kinetik chemischer Reaktionen</b> .....                                                                             | <b>128</b> |
| <b>5.3.1. einfache Kinetik chemischer Reaktionen</b> .....                                                                      | <b>128</b> |
| <b>5.3.1. die Reaktions-Geschwindigkeit</b> .....                                                                               | <b>133</b> |
| von der Durchschnitts-Geschwindigkeit zur Momentan-Geschwindigkeit .....                                                        | 135        |
| die Reaktions-Geschwindigkeits-Konstante $k$ .....                                                                              | 136        |
| Halbwert-Zeit $t_{1/2}$ bzw. $\tau_{1/2}$ .....                                                                                 | 143        |
| 5.3.1.1. Reaktionsordnung .....                                                                                                 | 144        |
| Reaktion 0. Ordnung .....                                                                                                       | 146        |

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Reaktion 1. Ordnung .....                                                       | 147        |
| Reaktion 2. Ordnung .....                                                       | 153        |
| Reaktion 3. Ordnung .....                                                       | 155        |
| Reaktionen höherer Ordnung .....                                                | 155        |
| Bestimmung der Reaktions-Ordnung.....                                           | 157        |
| Umkehrbarkeit chemischer Reaktionen .....                                       | 163        |
| 5.3.1.2. Abhängigkeit der Reaktions-Geschwindigkeit gerichteter Reaktionen..... | 165        |
| Konzentrations-Abhängigkeit.....                                                | 165        |
| Temperatur-Abhängigkeit .....                                                   | 166        |
| Berechnung der Aktivierungs-Energie .....                                       | 170        |
| Druck-Abhängigkeit .....                                                        | 173        |
| Verfolgung chemischer Reaktionen über den Druck.....                            | 175        |
| <b>5.3.2. das chemische Gleichgewicht.....</b>                                  | <b>177</b> |
| 5.3.2.1. das Massenwirkungs-Gesetz .....                                        | 183        |
| Abwandlungen des Massenwirkungs-Gesetz .....                                    | 189        |
| Berechnungen im chemischen Gleichgewicht .....                                  | 190        |
| Lösungs-Schema für Berechnungen zum chemischen Gleichgewicht .....              | 191        |
| 5.3.2.2. Abhängigkeit und Beeinflussung des chemischen Gleichgewichtes.....     | 205        |
| 5.3.2.2.1. Konzentrations-Abhängigkeit .....                                    | 205        |
| 5.3.2.2.2. Temperatur-Abhängigkeit .....                                        | 210        |
| 5.3.2.2.3. Druck-Abhängigkeit .....                                             | 214        |
| Verfolgung chemischer Gleichgewichte über den Druck.....                        | 218        |
| Prinzip von LE CHATELIER / BRAUN .....                                          | 222        |
| Beziehungen zwischen $K_c$ und $K_p$ .....                                      | 225        |
| Beziehungen zwischen der Gleichgewichts-Kinetik und der Thermodynamik .....     | 225        |
| Vorhersage der Reaktions-Richtung.....                                          | 226        |
| 5.3.2.3. spezielle chemische Gleichgewichte .....                               | 228        |
| 5.3.2.3.1. Löslichkeits-Gleichgewichte .....                                    | 228        |
| Wiederholung wichtiger Kenngrößen von Lösungen.....                             | 229        |
| der Lösungs-Vorgang – thermodynamisch betrachtet.....                           | 235        |
| Regeln zur Löslichkeit von Salzen .....                                         | 237        |
| Argentometrie.....                                                              | 240        |
| 5.3.2.3.2. Verteilungs- oder Extraktions-Gleichgewichte .....                   | 257        |
| <b>5.4. Thermodynamik und Kinetik – wer bestimmt die Reaktion?.....</b>         | <b>261</b> |
| <b>5.5. chemisch-technische Verfahren .....</b>                                 | <b>271</b> |
| 5.5.1. Ammoniak-Synthese .....                                                  | 271        |
| 5.5.2. OSTWALD-Verfahren – Synthese von Salpetersäure .....                     | 275        |
| 5.5.3. Kontakt-Verfahren – Synthese von Schwefelsäure.....                      | 276        |
| <b>Anhänge .....</b>                                                            | <b>280</b> |
| Formeln der Tabellenkalkulation .....                                           | 281        |
| <b>Literatur und Quellen: .....</b>                                             | <b>285</b> |
| Hilfs-Tabellen, Formeln, Schemata etc. zum Ausdrucken.....                      | 289        |
| Thermodynamik.....                                                              | 289        |
| Massenwirkungs-Gesetz .....                                                     | 290        |

**interessante / weiterführende / begleitende Links:**

[www.ltam.lu/IntroductionCD.html](http://www.ltam.lu/IntroductionCD.html) (div. Flash-Animationen zur Chemie (dt.))  
<http://www.lte.lu/chimie/shama/javapgrs.htm> (div. JAVA-Programme (JAR-Dateien))  
<http://www.lte.lu/chimie/2GSN/Cours/tm.htm> (div. Chemie-Themen)



---

## 5. chemische Reaktion

### 5.0. erste allgemeine und wiederholende Betrachtungen

Physikalische und chemische Grundkenntnisse (z.B. Merkmale, Eigenschaften und Vorgänge) haben wir nun zur Genüge wiederholt oder auf das notwendige Level gebracht. Wenden wir uns nun unserem eigentlichen Inhalt in der Chemie zu – den chemischen Reaktionen. Chemie ist eben, wenn es knallt, pufft und stinkt.

Chemische Veränderungen haben die Menschen schon frühzeitig fasziniert.

Auch lange vor der hochentwickelten Feuerwerks-Kunst der Chinesen benutzten die Menschen die verschiedensten chemischen Reaktionen zur Herstellung von Materialien, der Erzeugung von Wärme und Energie, der Zubereitung von Nahrung und vielem anderen mehr. Allerdings waren diese Vorgänge nicht in das naturwissenschaftliche Bewusstsein integriert.

Eine wichtige Epoche für die "Erkenntnis" chemischer Reaktionen war die Alchemie im Mittelalter. Hier begannen Forscher systematisch Stoffe und ihre Reaktionen miteinander zu untersuchen.

Die Abgrenzung zwischen Physik und Chemie ist eigentlich nicht so einfach, wie es auf den ersten Blick scheint. Beide Wissenschaften beschäftigen sich u.a. mit Stoffen. Sie analysieren ihre Eigenschaften und Veränderung. In der Schule werden Änderungen an den Zuständen (fest, flüssig und gasförmig) im Allgemeinen der Physik zugeschrieben. Kommt es dagegen zu veränderten (neuen) Stoffen, dann sind wir eher im Gebiet der Chemie. Betrachtet man z.B. radioaktive Vorgänge, dann tut sich ein kleines Problem auf. Durch Radioaktivität kann es ebenfalls zur Bildung neuer Stoffe kommen. Der radioaktive Zerfall des Isotops  $^{14}\text{C}$  zeigt dies beispielhaft:



#### **böse Frage zwischendurch:**

***Welches elementare Teilchen muss sich hier umwandeln? Zeigen Sie dies u.a. auch durch Hinzufügen der Kernladungszahlen in der Gleichung!***

|                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Definition(en): chemische Reaktion / chemischer Vorgang</b>                                                               |
| Unter einer chemischen Reaktion versteht man einen Vorgang / Prozess, bei dem neue Stoffe mit neuen Eigenschaften entstehen. |
|                                                                                                                              |

Trotzdem werden solche Vorgänge heute eher selten der Chemie zugerechnet. Traditionell scheint es in einigen Bundesländern eine historische bedingte Zuordnung der Kernvorgänge zur Chemie zu geben. Diesem Ansatz folgen wir hier nicht.

In der modernen Wissenschaft sieht man die Chemie als Physik der Elektronenhüllen. Chemische Veränderungen sind also immer mit Veränderungen der Elektronen-Hüllen und – Zuständen verbunden. Somit fallen die Kernreaktionen, Radioaktivität usw. aus dem chemischen Interesse heraus.

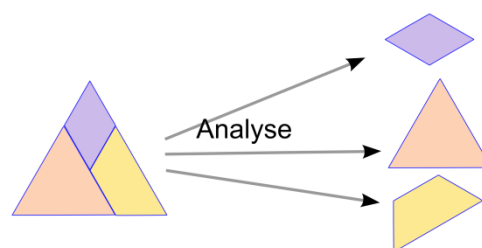
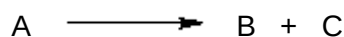
### Aufgaben:

1. Definieren Sie die Wissenschaft / den Begriff Chemie!
2. Vergleichen Sie Ihre Definition mit mindestens drei anderen aus dem Internet und verschiedener Fach-Literatur!

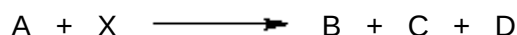
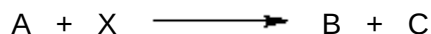
Aus traditioneller (allchemistischer) Sicht gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Arten von chemischen Reaktionen. Manchmal geht man sogar soweit, dass es sich um zwei verschiedene Arten der Chemie selbst handelt.

Die erste Art – von chemischen Reaktionen – mit denen sich die frühen Chemiker herumgeschlagen haben, sind die aufklärenden Untersuchungen gewesen. Man wollte einfach wissen, woraus der eine oder andere Stoff besteht und "was die Welt im Innersten zusammenhält" (GOETHE). Solche Reaktionen nennen wir Analysen.

Wenn man einfache, allgemeine Reaktions-Schemata für die Analysen angeben soll, dann tauchen die folgenden bestimmt besonders häufig auf:



Der Stoff **A** wird durch irgendwelche Methoden (z.B. Erhitzung, Elektrolyse, Bestrahlung) in mehrere Teile zerlegt. Dabei kann man davon ausgehen, dass diese Teile zu einem Großteil die Bau-Bestandteile von **A** waren. Setzt man eine zweiten Stoff **X** zu, um **A** zu zerlegen / zerstören, dann wären auch solche Schemata denkbar:



Natürlich lassen sich die Reihen auf noch mehr Stoffe erweitern.

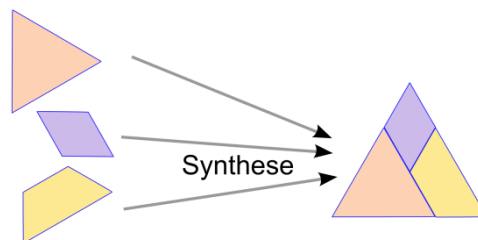
### **Definition(en): Analyse**

Chemische Vorgänge, bei denen ein (Rein-)Stoff in einfachere Verbindungen oder Elementen zerlegt wird, nennt man Analysen.

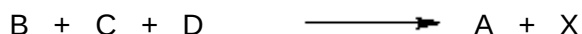
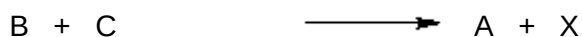
Die Analyse eines Stoffes ist die Aufklärung seiner Bestandteile.

Das Gegenstück zu den Analysen sind die Synthesen. Hier soll ein Stoff gezielt zusammengebaut werden. Das große Ziel der alchemistischen Synthesen war damals Gold, was sich aber als unrealisierbare Möglichkeit herausstellte.

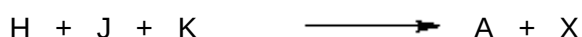
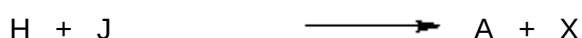
Wenn wir nun unseren Stoff A bilden wollen, dann können wir zuerst einmal versuchen die Analysen einfach umzudrehen:



oder:



In den meisten Fällen führt das auch zum Erfolg. Manchmal bedarf es anderer Reaktionen, die sich aber nicht im Schema unterscheiden:



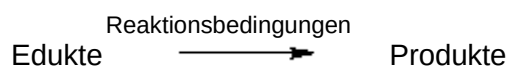
### Definition(en): Synthese

Chemische Vorgänge, bei denen ein (Rein-)Stoff aus einfacheren Verbindungen oder Elementen gebildet wird, nennt man Synthesen.

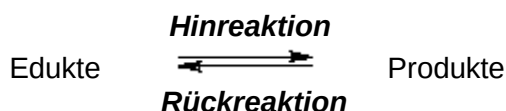
Die Synthese eines Stoffes ist chemisch-technisch gesehen ein Verfahren zur Herstellung dieses Stoffes.

In der Chemie gibt es ein verbindliches Vorschriften-System zur Darstellung von chemischen Reaktionen. Das Mittel ist die chemische Gleichung, die bis auf einen oder zwei gerichtete Pfeile – statt einem Gleichheits-Zeichen – genau auch dem Anspruch einer Gleichung erfüllen muß. Mit anderen Worten, sachlich müssen die linke und die rechte Seite der chemischen Gleichung auch wirklich gleich sein. Für den Chemiker heißt dies, dass z.B. auf beiden Seiten gleichviele Atome vorkommen müssen. Auch die Summe der Ladungen muß auf beiden Seiten äquivalent sein.

Die Ausgangsstoffe (Edukte, Reaktanten) stehen üblicherweise auf der linken Seite der Gleichung. Über dem Reaktions-Pfeil, der die rechte Seite mit den Produkten abtrennt, können die Reaktions-Bedingungen notiert werden:



Kann parallel zur Produkt-Bildung auch die Rückbildung der Edukte (Zerfall der Produkte) beobachtet werden, dann unterscheidet man Hin- und Rück-Reaktion, die in einer gemeinsamen Reaktions-Gleichung notiert werden können:



Hinter den Produkten folgt oftmals noch eine Angabe zu Energie-Aufnahme oder –Abgabe:



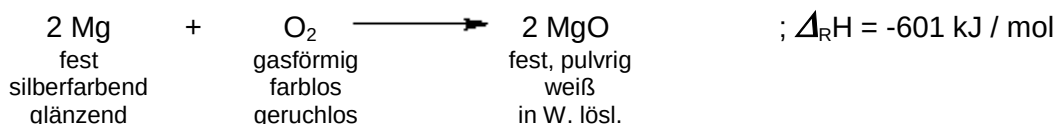
Dazu werden wir gleich noch genauere Angaben machen.

Chemische Reaktionen zeigen verschiedene charakteristische Merkmale. Sie lassen sich so zusammenfassen:

#### Merkmale einer chemischen Reaktion:

- Veränderung der Stoffe (Stoffumwandlung / neue Stoffe mit neuen Eigenschaften)
- Veränderung der Energie(-Form) (Energieumwandlungen)
- Veränderung der Bindungen (Umbau der Bindungen)
- Veränderungen der Teilchen und / oder ihrer Arten

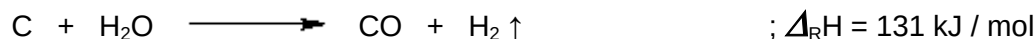
Das Merkmal der **Veränderung der Stoffe (Stoffumwandlung)** ist meist relativ leicht nachzuvollziehen. Im Verlauf einer chemischen Reaktion verändern sich die Stoffe. Da jeder Stoff mit charakteristischen Eigenschaften ausgestattet ist, können wir durch Vergleich der Eigenschaften der Ausgangsstoffe mit denen der Reaktionsprodukte Veränderungen erkennen.



Mit Hilfe der neuen Eigenschaften (der entstehenden Stoffe) können wir auch oft die Art der Reaktionsprodukte bestimmen. Dadurch erhalten wir Hinweise auf **umgebaute oder veränderte Bindungen** sowie **neue Teilchen-Arten**. Sind z.B. Reaktions-Produkte im Vergleich zu den Ausgangsstoffen Wasser-löslich, dann deutet dies auf die Bildung polarer Bindungen hin. Die Merkmale Veränderung von Bindungen und der von Teilchen sind makroskopisch nur indirekt zugänglich. Hier ist eine Betrachtung auf theoretischer Ebene notwendig.

Die offensichtlichsten Zeichen von **Energie-Umwandlungen (Veränderungen der Energie(-Formen))** sind die häufig auftretenden Energie-Abgaben. Aber auch das Vielfach notwendige Erwärmen von Stoffen zum Starten eines chemischen Vorgang's sind ein charakteristisches Zeichen für energetische Prozesse. Bei Verbrennungen / Oxidationen – wie der von Magnesium – treten helle Licht-Erscheinungen oder / und Wärme-Abgaben auf.

Betrachten wir aber einmal den Verlauf der Reaktion (Vergasung von Kohle) von glühender Kohle mit Wasserdampf (Wassergas):

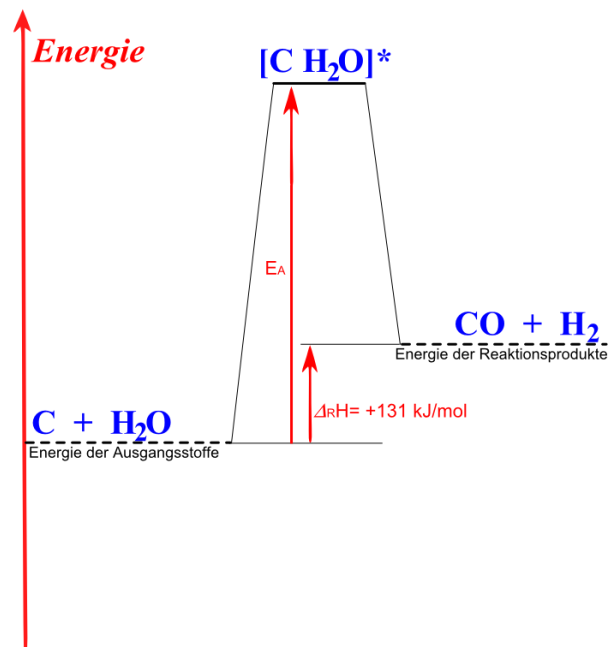


Bei dieser Reaktion muss Energie zugefügt werden, damit die Reaktion läuft. Es reicht auch nicht, wie bei vielen anderen Reaktionen ein bisschen Anwärmen, um die Reaktion zu starten, sondern hier ist ständiger Energie-Einsatz notwendig.

Den energetischen Verlauf einer chemischen Reaktion kann man in einem Energie-Schemata darstellen.

Die Ausgangsstoffe C und H<sub>2</sub>O haben vor der Reaktion ein bestimmtes Energie-Niveau. Dieses ist weitaus größer als 0 kJ / mol. Das genaue Niveau lässt sich aber nicht bestimmen. Der absolute Energie-Inhalt eines Stoffes ist derzeit noch nicht zugänglich.

Gut bestimmbar sind aber Energie-Differenzen, wie z.B. die Bildungs-Energie (= Bildungs-Enthalpie) eines Stoffes aus seine Elementen. Da die Elemente nicht aus Elementen gebildet werden können, wird deren Bildungs-Energie auf 0 kJ/mol gesetzt. Damit hat man eine gute relative Bezugsgröße. Hier soll nochmals betont werden, dass eine Bildungs-Enthalpie von 0 kJ / mol nicht bedeutet, dass der Stoff keine Energie besitzt. Die besitzt er natürlich, aber wir können den genauen Wert nicht bestimmen. Nur die Messung von Veränderungen sind derzeit physikalisch möglich. Deshalb schreiben wir auch immer  $\Delta H$  bzw.  $\Delta E$  ( $\Delta$  für delta ... Differenz / Veränderung). Chemisch lassen sich Elemente nicht aus anderen "kleineren" Teilchen bilden, deshalb ist die Bindungs-Energie definitionsgemäß auf 0 kJ/mol gesetzt.



einfaches Energie-Niveau-Schema einer Reaktion mit (notwendiger) Energie-Aufnahme

nach dem prinzipiellen Reaktions-Schema lassen sich die folgenden Reaktions-Typen klassifizieren:

- einfache / gerichtete Reaktion



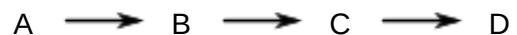
- reversible / umkehrbare Reaktion (chemisches Gleichgewicht)



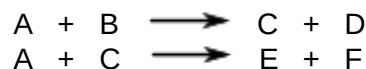
- Parallel-Reaktionen



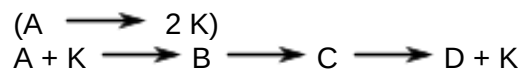
- Folge-Reaktionen



- konkurrierende Folge-Reaktionen



- geschlossene Folge-Reaktionen (Ketten-Reaktionen)



- Folge-Reaktionen mit Parallel-Reaktionen

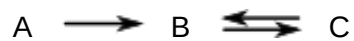


- Folgereaktionen mit umkehrbaren Teilschritten

- ... mit vorgelagertem Gleichgewicht



- ... mit nachgelagertem Gleichgewicht





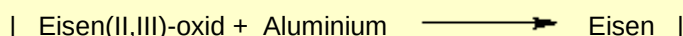
## Methode: Schrittfolge zum Aufstellen und Ausgleichen von chemischen Gleichungen (Empfehlungen)

Das Aufstellen und Ausgleichen von chemischen Reaktions-Gleichungen wird häufig als schwieriges Problem in der Chemie betrachtet. Praktisch ist es eigentlich recht einfach, wenn man bestimmte Regeln und Arbeitsschritte beachtet. Die folgenden Arbeitsschritte führen in den meisten Fällen zum Erfolg:

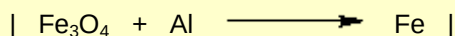
### Beispiel:

Eisen(II,III)-oxid soll mit Hilfe von Aluminium zu Eisen reduziert werden.

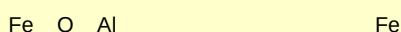
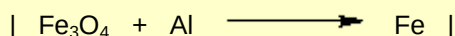
1. Erfassen von Ausgangsstoffen und Reaktionsprodukten (bei Bedarf zuerst als Wortgleichung)! Die Ausgangsstoffe werden auf der linken Seite, die Reaktionsprodukte auf der rechten Seite mit Plus getrennt notiert. Ausgangsstoffe und Reaktionsprodukte sind durch einen Reaktionspfeil voneinander getrennt (der Doppelpfeil darf ebenfalls verwendet werden).  
(solange eine Gleichung noch nicht fertiggestellt ist, sollten links und rechts senkrechte Striche als Kennzeichen genutzt werden)



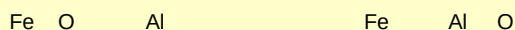
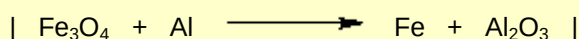
2. Umwandeln der Stoffnamen in chemische Symbole bzw. Formeln! Verwenden Sie dazu – zumindestens bis Sie sich sicher sind und weitestgehend fehlerfrei arbeiten – ein Tafelwerk!



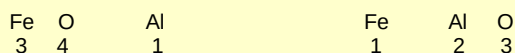
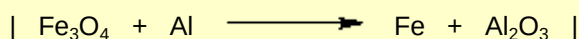
3. Ergänzen fehlender Elemente / Stoffe! Prüfen Sie, ob alle Elemente auf beiden Seiten vorkommen oder, ob noch Stoff ergänzt werden müssen! Man kann sich die Elemente usw. immer gut unter der (werdenden) Gleichung notieren (als eine Art Nebenrechnung (z.B. mit Bleistift)).



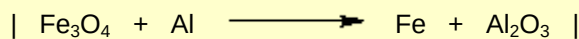
In diesem Fall brauchen wir auf der Produkte-Seite noch Al und O. Als mögliche Verbindung kommt hier Aluminiumoxid in Frage (Die Oxidation von Aluminium würde auch gut zur erwähnten Reduktion passen).



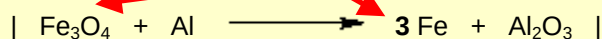
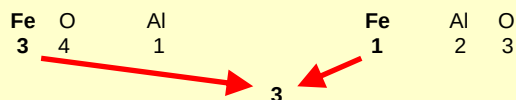
4. Erfassen der Stoffmengen / Atom-Zahlen auf beiden Gleichungs-Seiten! Beachten Sie dabei sowohl die indizierten Mengen-Angaben, wie auch die Mengen-Angaben, die ev. schon vor einer Formel stehen!



5. Ausgleichen der einzelnen Elemente über das "kleinste gemeinsame Vielfache"! Gehen Sie dabei für jedes Element einzeln vor! Zuerst sollte man die Elemente ausgleichen, die auf der Ausgangsstoff-Seite besonders häufig vorkommen! An gerade ausgeglichene Elemente gebundene weitere Elemente sollten dann gleich nachfolgend bearbeitet werden! (Bei anorganischen Reaktionen sollte man sich immer zuerst an die "besonderen" Metall- und Nichtmetall-Elemente heranmachen, zum Schluss können dann die "gewöhnlichen" Elemente, wie Wasserstoff und Sauerstoff folgen! Bei organischen Reaktionen hat sich die Reihenfolge **C – H – O – weitere Elemente** als recht praktisch herausgestellt.)

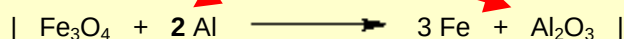
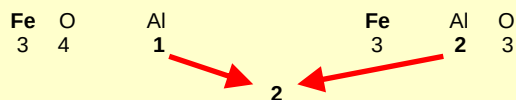


1. Runde:

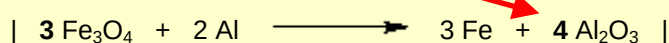


Hinweis!  
die 1 (vor  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) wird nicht  
mitgeschrieben!

2. Runde:

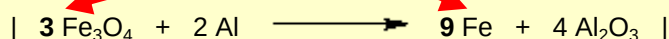
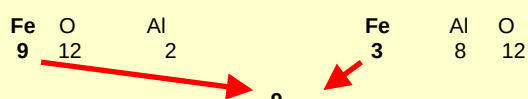


3. Runde:

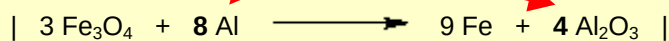


Wenn alle Elemente 1x durch  
sind, dann wieder von vorne  
anfangen (zumindestens um  
den Erfolg zu kontrollieren)!

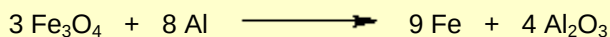
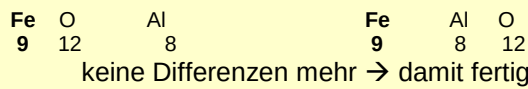
4. Runde:



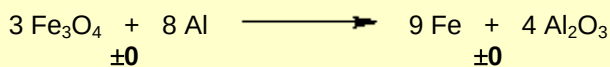
5. Runde:



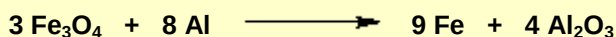
6. Runde:



6. Kontrolle, ob z.B. auch Ladungen ausgeglichen! Die chemische Gleichung muss insgesamt dem Anspruch einer mathematischen Gleichung genügen.



keine Differenz → damit fertig:



## Aufgaben (Ausgleichen von chemischen Gleichungen):

### **1. Gleichen Sie aus! (Für weitere vertiefende Übungen und zur Wiederholung der Chemie aus der allgemeinbildenden Schule stehen weitere Informationen zu den Reaktionen in Klammern!)**

- a)  $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2 \longrightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \text{HCl}$  (Methan wird mit Chlor substituiert, es bildet sich Monochlormethan und Chlorwasserstoff)
- b)  $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$  (Cupfer(I)-oxid wird mit Wasserstoff reduziert, es entsteht elementares Cupfer und Wasser)
- c)  $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$  (Schwefeldioxid reagiert mit Wasser zu schwefli-ger Säure) *[Nichtmetalloxid + Wasser  $\rightarrow$  Säure]*
- d)  $\text{Cu} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CuO}$  (Cupfer wird (mit Sauerstoff) verbrannt / oxidiert zu Cupfer(II)-oxid)
- e)  $\text{Al} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$  (Aluminium wird (mit Sauerstoff) verbrannt / oxidiert zu Aluminiumoxid)
- f)  $\text{Na} + \text{Cl}_2 \longrightarrow \text{NaCl}$  (Natrium verbrennt in Chlor zu Natriumchlorid (Koch-salz)) *[Metall + Nichtmetall  $\rightarrow$  Salz]*
- g)  $\text{P} + \text{Cl}_2 \longrightarrow \text{PCl}_3$  (Phosphor verbrennt in Chlor zu Phosphortrichlorid (Phosphor(III)-chlorid))
- h)  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} \longrightarrow \text{Fe} + \text{CO}$  (Eisen(III)-oxid wird mit Cohlenstoff zu Eisen und Cohlenmonoxid reduziert (Hochofen-Prozess))
- i)  $\text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{H}_3\text{PO}_4 \longrightarrow \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{H}_2\text{O}$  (Magnesiumhydroxid wird mit Phosphorsäure neutralisiert, es bildet sich Magnesiumphosphat und Wasser) *[Base + Säure  $\rightarrow$  Salz + Wasser]*
- j)  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (Glucose wird mit Sauerstoff zu Cohlendioxi-d und Wasser umgesetzt (Zell-Atmung))
- k)  $\text{N}_2 + \text{H}_2 \longrightarrow \text{NH}_3$  (Bildung von Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff)
- l)  $\text{K}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{KOH}$  (Kaliumoxid reagiert mit Wasser zu Kaliumhydroxid) *[Metalloxi-d + Wasser  $\rightarrow$  Base]*

### **2. Prüfen Sie welche alternativen Gleichungen (mit anderen Zahlen-Kombinationen) möglich sind! Begründen Sie Ihre Auswahl!**

### **3. Stellen Sie zu den folgenden Wort- bzw. Stoff-Gleichungen passende che-mische Gleichungen auf!**

- a) Magnesium verbrennt in der Luft (/mit Sauerstoff) zu Magnesiumoxid
- b) Ethan wird mit Chlor substituiert, es bildet sich Monochlorethan und Chlorwasserstoff
- c) Phosphor verbrennt zu (Di-)Phosphorpentoxid (Phosphor(V)-oxid)
- d) Natrium reagiert mit Sauerstoff zu Natriumoxid
- e) Zink reagiert mit Chlorwasserstoffsäure (Salzsäure) zu Zinkchlorid und Wasserstoff(-Gas) *[Metall + Säure  $\rightarrow$  Salz + Wasserstoff]*
- f) (Di-)Stickstoffdioxid (Stickstoff(II)-oxid) reagiert mit Sauerstoff zu (Di-)Stickstoffpentoxid (Stickstoff(V)-oxid)
- g) Calciumcarbonat wird mit Salzsäure umgesetzt, es bildet sich Calciumchlorid, Wasser und Cohlendioxi-d
- h) Natrium reagiert mit Wasser unter Bildung von Natriumhydroxid *[Metall + Wasser  $\rightarrow$  Base]*
- i) Silbernitrat reagiert mit Blei(IV)-chlorid zu Silberchlorid und Blei(IV)-nitrat
- j) Aluminium reagiert in Schwefelwasserstoff(-Gas) zu Aluminiumsulfid und Wasserstoff(-Gas)
- k) Zinn(IV)-chlorid reagiert mit Wasser zu Zinnhydroxid und Chlorwasserstoff
- l) Blei(II)-oxid reagiert mit schwefli-ger Säure zu Blei(II)-sulfid und Wasser *[Metalloxi-d + Säure  $\rightarrow$  Salz und Wasser]*

**4. Ergänzen Sie die folgenden Wort- bzw. Stoff-Gleichungen um fehlende Stoffe und stellen Sie dazu die chemischen Gleichungen auf!**

- a) Wasserstoff + ???  $\longrightarrow$  Wasser
- b) ??? + Sauerstoff  $\longrightarrow$  Schwefeldioxid
- c) Magnesiumoxid + ???  $\longrightarrow$  ??? + Wasser
- d) Magnesium reagiert mit ??? zu Magnesiumoxid
- e) Mangan reagiert mit Schwefelsäure zu Mangansulfat ((und einem Gas))
- f) Schwefeldioxid verbrennt zu Schwefeltrioxid
- g) Eisen reagiert mit ??? zu Eisen(III)-chlorid
- h) Methan wird Brom substituiert
- i) Quecksilber(I)-oxid reagiert mit Salpetersäure und Sauerstoff zu Quecksilber(II)-nitrat und ???
- j) Silbernitrat reagiert mit Zinkchlorid zu Silberchlorid und Zinknitrat

**5. Stellen zu den folgenden Reaktions-Beschreibungen die vollständigen Wort- bzw. Stoff-Gleichungen sowie die chemischen Gleichungen auf!**

- a) Verbrennung von Aluminium
- b) (Mono-)Stickstoff(mon-)oxid wird zu Distickstofftrioxid umgesetzt
- c) Natriumoxid wird in Wasser gelöst, es bildet sich u.a. Natriumhydroxid
- d) Calcium wird oxidiert
- e) Aluminiumhydroxid reagiert mit Schwefelsäure
- f) Eisen(III)-oxid wird mit Kohlenstoff umgesetzt
- g) Methan wird mit Brom substituiert
- h) salpetrige Säure wird mit Calciumhydroxid umgesetzt / neutralisiert
- i) Calciumcarbonat reagiert in Lösung mit Kohlendioxid zu Calciumhydrogencarbonat
- j) Phosphorchlorid reagiert mit Wasser zu (Di-)Phosphortrioxid und Chlorwasserstoff

**6. Ergänzen Sie eventuelle Fehlstellen und stellen Sie die vollständigen chemischen Gleichungen auf! (ev. müssen auch weitere Stoffe ergänzt werden!)**

- a) Schwefeltrioxid reagiert mit Wasser
- b)  $P + ??? \longrightarrow PCl_3$
- c)  $CuS + ??? \longrightarrow CuO + SO_2$
- d)  $Fe + Br_2 \longrightarrow$  (Hinweis!: Eisen ist meist drei-wertig)
- e)  $Na_2O + H_2O \longrightarrow$
- f)  $SO_2 + ??? \longrightarrow SO_3$
- g) Aluminium reagiert mit ??? zu Aluminiumbromid
- h) Calciumoxid wird in Wasser gelöst
- i) Phosphorpentoxid wird in Wasser gelöst
- j) Helium wird mit Sauerstoff erhitzt

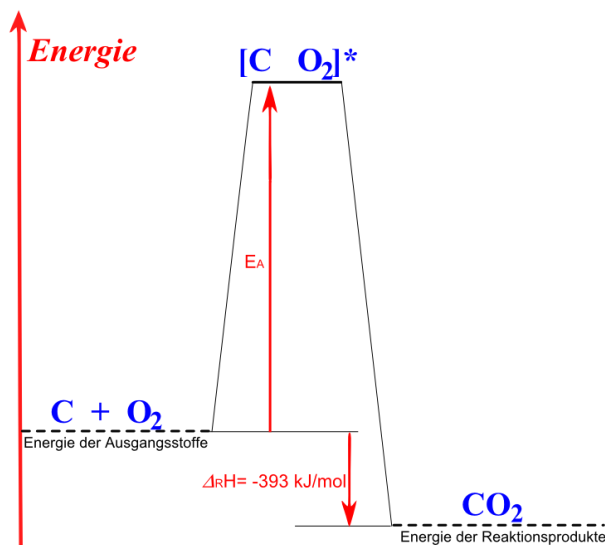
**für die gehobene Anspruchsebene:**

**7. Finden Sie die Fehler in den folgenden Gleichungen! (Die Fehleranzahl ist in geschweiften Klammern angegeben! Je nach Auslegung können es natürlich auch noch mehr Fehler sein.)**

- a)  $2 C + 3 O_2 \longrightarrow 2 CO_3$  {4}
- b)  $Li + O_2 \longrightarrow LiO_2$  {3}
- c)  $3 Fe + Cl_3 \longrightarrow FeCl_3$  {4}
- d)  $Na_2O_2 + 2 HO \longrightarrow Na(OH)_2$  {5}
- e)  $Mg + Br \longrightarrow AlF_2$  {3}
- f)  $Al_3O_2 + 4 H_2O \longrightarrow Al_3(OH)_4$  {6}
- g)  $CO_2 + H_2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + O_2$  {3}
- h)  $H_3SO_3 + MgOH \longrightarrow MgSO_4 + H_3O$  {4}
- i)  $CH_4 + Cl_2 \longrightarrow CH_2Br_2 + 2 HCl$  {2}
- j)  $Mn + H_2SO_4 \longrightarrow Mn_2(SO_3)_3 + O_2 + H_2O$  {3}

Für einen effektiven Zusammenstoß müssen die Teilchen eine bestimmte Energie (Bewegungs-Energie) besitzen. Diese nennen wir Aktivierungs-Energie  $E_A$ , weil sie quasi die Reaktion in Gang setzt. Nur mit ihr kann es zum Umbau der chemischen Bindungen kommen. Eventuell muss den Ausgangsstoffen noch Energie zugeführt werden, damit genug Teilchen eine ausreichende Energie besitzen. Erst dann können genügend effektive Zusammenstöße im Stoffgemisch ausführen werden.

Wie wir schon gesehen haben gibt es zwei mögliche Fälle. Entweder die Reaktion benötigt Energie, wie es z.B. in der oben vorgestellten Reaktion der Fall ist. Dann wird nicht der gesamte Teil der zugeführten (Aktivierungs-)Energie wieder abgegeben. Die Reaktionsprodukte haben letztendlich ein höheres Energie-Niveau als die Ausgangsstoffe. Eine Reaktion, die Energie für ihren Ablauf bindet ("verbraucht"), nennen wir **endotherm**. Im zweiten Fall ist der Reaktionsverlauf von einer größeren Energie-Abgabe begleitet (z.B. Licht, Wärme, elektrische Energie). Diese Energie-Abgabe übersteigt auch die zugeführte Energie (zur Aktivierung der Reaktion). In so einem Fall nennen wir die Reaktion **exotherm**. Exotherme Reaktionen erkennt man an einem Minus-Zeichen vor dem Energie-Betrag.

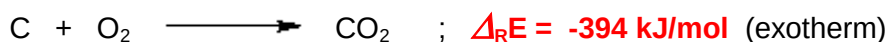


einfaches Energie-Niveau-Schema einer exothermen Reaktion

Insgesamt müssen wir uns aber immer vergegenwärtigen, dass Energie nie neu entsteht oder einfach so verschwindet.

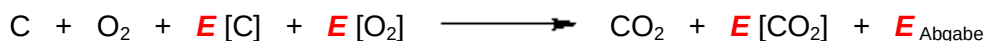
Die Summe aller Energien ist immer konstant. Wir haben es immer nur mit Energie-Umwandlungen zu tun (Energie-Erhaltungssatz).

Die sparate Schreibweise der Energie hinter die chemische Gleichung erscheint zu Anfang vielleicht etwas verwirrend.



Dabei wird versucht den stofflichen Teil, der ja exakt einer mathematischen Gleichung entspricht, vom energetischen zu trennen. Hier haben wir mal auf der einen und mal auf der anderen Seite kein Äquivalent. Der Grund dafür ist, dass uns die absoluten Energie-Werte nicht zugänglich sind.

Wollte man die Energie mit in die chemische Gleichung schreiben, dann würde eine exotherme Reaktion (s. Bsp. oben) so aussehen:



Da die absoluten Energien der Stoffe nicht zugänglich sind, würde



übrigbleiben. Für eine endotherme Reaktion (z.B. BOUDOUARD-Reaktion) hätte man dann eine leicht veränderte Gleichung, da ja die Energie zusätzlich notwendig ist:



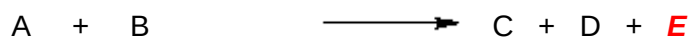
Will man sich die Energie mit in die Gleichungen denken, dann wird das folgende Schema für alle chemischen Reaktionen verwendet:



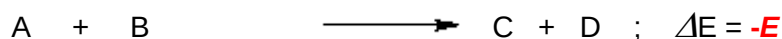
Ist die Reaktion endotherm – wie eben vorgestellt – dann steht in der vorgeschriebenen Schreibweise genau diese Energie hinter der Gleichung:



Um bei einer exothermen Reaktion die freigesetzte Energie auf die Ausgangsstoff-Seite zu bekommen müssen wir sie von der Produktseite abziehen. Sie taucht dann mit negativen Vorzeichen bei den Ausgangsstoffen auf:



In der fachlich exakten Schreibung dann nun so:



Die **Veränderungen der Bindungen** lassen sich am Aufbrechen von Bindungen ("Lösen der Bindungen") und am Neuknüpfen solcher festmachen. In unserem Beispiel werden die Bindungen zwischen den Wasserstoff- und Sauerstoff-Atomen (des Wassers) aufgebrochen. Neue Bindungen entstehen im molekularen Wasserstoff und im Kohlenmonoxid(-Molekül).

Auch die Bindungs-Arten ändern sich. Im Kohlenstoff finden wir eine Atom-Bindung. Die Atome im Wasser sind über eine Atombindung mit teilweisen Ionen-Charakter (auch: polare Atom-Bindung) verknüpft. In den Reaktionsprodukten finden wir ebenfalls eine Atom-Bindung (Wasserstoff-Molekül) und eine polare Atombindung (Kohlenmonoxid). Diese ist hier aber weitaus schwächer ausgebildet, als beim Wasser-Molekül.

Im gewissen Sinne hätten wir damit auch das letzte Merkmal der chemischen Reaktion – die Veränderungen der Teilchen – mit abgehandelt. Die Teilchen bzw. ihre Arten haben sich deutlich geändert. Aus einem Feststoff (Atom-Gitter) und einem Molekül entstehen zwei neue Moleküle. Später werden wir auch noch sehen, dass sich auch die Art der Teilchen (Atome bzw. Ionen) u.U. verändert.

Zur Unterscheidung von chemischen Reaktionen hat man diverse Möglichkeiten. Jede rückt besondere Aspekte einer chemischen Reaktion (bzw. einer Gruppe von Reaktionen) in den Vordergrund.

### Definition(en): exotherme Reaktion

Chemische Reaktionen, bei denen es insgesamt zu einer Energie-Abgabe kommt, nennen wir exotherm.

Eine exotherme Reaktion ist eine chemische Reaktion, bei der mehr Energie abgegeben als aufgenommen (z.B. zur Aktivierung) wird.

---

**Definition(en): endotherme Reaktion**

Chemische Reaktionen, bei denen es insgesamt zu einer Energie-Aufnahme kommt, nennen wir endotherm.

Eine endotherme Reaktion ist eine chemische Reaktion, bei der mehr Energie aufgenommen (einschließlich der Aktivierung) als abgegeben wird.

Die Vielzahl von verschiedensten chemischen Reaktionen schreien schon nach einer weitreichenden Klassifizierung. Einige Möglichkeiten haben wir gerade wiederholt bzw. kennengelernt. Solche Einteilungs-Möglichkeiten waren:

**nach der Reaktions-Arten**

- Synthesen (Bildungs-Reaktionen)
- Analysen (Zerlegungs- bzw. Spaltungs-Reaktionen)
- Kombinationen aus Analysen und Synthesen (Umwandlungen)

**nach dem energetischen Verlauf**

- endotherme Reaktionen (Reaktionen mit/unter Energie-Aufnahme)
- exotherme Reaktionen (Reaktionen mit /unter Energie-Abgabe)

Diejenigen, die sich schon mit organischer Chemie beschäftigt haben, kennen vielleicht noch das Einteilungs-Prinzip **nach dem Reaktions-Schema**:

- Additions-Reaktionen  
$$A + B \longrightarrow C$$
- Eliminierungs-Reaktionen  
$$A \longrightarrow B + C$$
- Substitutions-Reaktionen  
$$A + B \longrightarrow C + D$$

Bei geeigneter Differenzierung nach der Angriffs-Art (nukleophil, elektrophil, radikalisch) lassen sich mit diesem Prinzip auch schon erste Einblicke in das Wesen chemischer Reaktionen erhaschen. Für weiterführende Untersuchungen – vor allem im anorganischen Bereich – bietet sich dagegen die Einteilung **nach dem charakterisierendem Verlauf** (Wesen der Reaktion) an. Man unterscheidet dann:

- Säure-Base-Reaktionen (Reaktionen mit Protonen-Übergang) (→ [5.4.1. Säure-Base-Reaktionen](#))
- Redox-Reaktionen (Reaktionen mit Elektronen-Übergang) (→ [5.4.2. Redox-Reaktionen / Reaktionen mit Elektronen-Übergang](#))
- photochemische Reaktionen (Licht-abhängige Reaktionen)
- Komplex-Reaktionen (Bildung, Umwandlung und Zerlegung von Komplexen) (→ [5.4.4. Komplex-Reaktionen](#))

## Modifikations-Umwandlungen - Grenzfälle chemischer Reaktionen

| Stoff              | Modifikationsumwandlung |                                            | Umwandlung-Bedingung(en) |
|--------------------|-------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|
|                    | Modifikation1           | Modifikation2                              |                          |
| S                  | rhombisch               | $\rightleftharpoons$ monoklin              | thermisch; 369 K         |
| Sn                 | kubisch                 | $\rightleftharpoons$ tetragonal            | thermisch; 291 K         |
| Co                 | hexagonal               | $\rightleftharpoons$ kubisch flächenzentr. | mechanisch               |
|                    |                         |                                            |                          |
| SiO <sub>2</sub>   | $\alpha$ -Quarz         | $\rightleftharpoons$ $\beta$ -Quarz        | thermisch; 846 K         |
| SiO <sub>2</sub>   | $\beta$ -Quarz          | $\rightarrow$ $\alpha$ -Quarz              | Neutronen-Strahlung      |
| SiO <sub>2</sub>   | $\beta$ -Quarz          | $\rightarrow$ amorph                       | mechanisch               |
| TiO <sub>2</sub>   | rhombisch               | $\rightarrow$ tetragonal                   | thermisch; 369 K         |
| ZrO <sub>2</sub>   | tetragonal              | $\rightarrow$ kubisch                      | Neutronen-Strahlung      |
| BaTiO <sub>3</sub> | tetragonal              | $\rightarrow$ kubisch                      | Neutronen-Strahlung      |
|                    |                         |                                            |                          |
| FeS <sub>2</sub>   | Markasit                | $\rightarrow$ Pyrit                        | mechanisch               |
|                    |                         |                                            |                          |
| NH <sub>4</sub> Cl | $\alpha$ -Modifikation  | $\rightleftharpoons$ $\beta$ -Modifikation | thermisch; 458 K         |
| NH <sub>4</sub> I  | $\alpha$ -Modifikation  | $\rightleftharpoons$ $\beta$ -Modifikation | thermisch; 256 K         |
|                    |                         |                                            |                          |

## Experimente zum Thema: Chemische Reaktion / physikalischer Vorgang

### Labor-Experiment 5.0.A

#### **Durchführung / Ablauf:**

- Wir erhitzen ein Stück Schwefel ( $\approx$ Würfel 1 x 1 x 1 cm) oder entsprechende Menge Pulver in einem Reagenzglas (RG) vorsichtig über einer Hitze-Quelle (BUNSEN-Brenner od.ä.).

#### **Beobachtungen:**

- Die feste, kristalline bis pulvrige Stoff-Probe ist hellgelblich gefärbt und nur sehr schwach bis gar nicht riechend.
- Der Schwefel schmilzt. Es entsteht eine braune, relativ leichtgängige Flüssigkeit.
- Beim weiteren Erhitzen siedet die Flüssigkeit. Es bildet sich gelblicher Rauch, der sich an den oberen (kälteren) RG-Bereichen absetzt. Die hier abgesetzten festen Teile sind fein-kristallin und gelblich.
- Beim ev. noch weiteren Erhitzen wird die braune Flüssigkeit dick-flüssig und hat nach dem Zerstören des RG eine Gumm-artige Konsistenz.

### Labor-Experiment 5.0.B

#### **Durchführung / Ablauf:**

- Wir erhitzen eine Stück bzw. eine entsprechende Pulver-Menge von Schwefel in einem Verbrennungs-Löffel stark (bis er sich entzündet). Die Verbrennung sollte im Abzug erfolgen und die Produkte ev. in einem ERLNMEYER-Kolben aufgefangen werden

#### **Beobachtungen:**

- Die feste, kristalline bis pulvrige Stoff-Probe ist hellgelblich gefärbt und nur sehr schwach bis gar nicht riechend.



- Der Schwefel schmilzt beim Erhitzen. Es entsteht eine braune (nur bei neuen Löffeln sichtbar), relativ leichtgängige Flüssigkeit. Die Schmelze fängt dann mit schwacher bläulicher Flamme an zu brennen. Es bildet sich ein stechend riechender Rauch.

### Labor-Experiment 5.0.C

#### **Durchführung / Ablauf:**

- Es soll versucht werden, die gebildeten Stoffe (Produkte) aus den Experimenten 5.0.A und 5.0.B in Wasser zu lösen und die Lösung dann mit Unitest-Papier od. –Lösung geprüft werden.

#### **Beobachtungen:**

- Die abgesetzten gelblichen Kristalle (Exp. 5.0.A) lösen sich nicht in Wasser. Das Unitest verändert seine Farbe hin zu neutral.
- Der gelbliche Rauch (Exp. 5.0.B) verschwindet bei Kontakt mit Wasser, auch der Geruch reduziert sich deutlich (bleibt aber feststellbar). Unitest zeigt eine deutliche Veränderung zu einem sauren Medium / pH an.

#### **Ergebnisse (Exp. 5.0.C):**

- Das Produkt von Exp. 5.0.A hat die gleichen Eigenschaften wie Schwefel, beide Stoffe sind gelblich, fest, kristallin und wahrscheinlich nicht in Wasser löslich. Eine Stoff-Veränderung hat somit nicht stattgefunden.
- Das Produkt von Exp. 5.0.B hat andere Eigenschaften als der Schwefel. Das Produkt bleibt gasförmig (Rauch) und hat einen starken beißenden Geruch, es löst sich in Wasser (verschwindet aus dem Gefäß). Unitest zeigt eine Lösung als Säure an. Da neue Stoffe auftauchen, muss eine Stoff-Veränderung stattgefunden haben.

#### **Ergebnisse (Exp. 5.0.A):**

- Da trotz kurzzeitiger Veränderung der Eigenschaften (Farbe von gelb nach braun) nach dem Sieden und Kondensieren wieder gelber Schwefel entsteht, kann man davon ausgehen, dass keine Stoff-Veränderung stattgefunden hat. Es handelt sich beim Erhitzen des Schwefels um einen physikalischen Vorgang. Die Veränderung der Farbe bei der Schmelze zeigt eine veränderte Struktur des Stoffes an.

#### **Ergebnisse (Exp. 5.0.B):**

- Da wir mittels Exp. 5.0.C mindestens einen neuen Stoff (mit veränderten Eigenschaften) beobachten konnten, liegt hier wahrscheinlich eine chemische Reaktion vor. Es ist eine Energie-Freisetzung zu beobachten (brennende blaue Flamme), was den Verdacht auf einen chemischen Vorgang verstärkt.

Für eine ordnungsgemäß durchgeführte experimentelle Methode hätten wir natürlich vorher passende Vorbetrachtungen machen müssen und dann eine geeignete experimentelle These für unseren Versuch aufstellen sollen. Die könnte z.B. so lauten:

**Wenn** es beim Erhitzen eines Stoffes zur Bildung eines neuen Stoffes mit neuen / anderen Eigenschaften und zu einer Energie-Freisetzung oder notwendigen Zufuhr kommt, **dann** liegt eine chemische Reaktion vor, **sonst** handelt es sich um einen physikalischen Vorgang (Änderung des Aggregatzustandes).

hervorgehobene Elemente:

Durchführung

Beobachtung

mögliches Ergebnis1 (Bestätigung / positiver Test) bzw. Ergebnis2 (Ablehnung / positiver Test)

### Aufgaben:

**1. Prüfen Sie ob es sich bei den folgenden Vorgängen um physikalische oder chemische Vorgänge handelt! Begründen Sie jeweils Ihre Entscheidung!**

| Nr. | Beschreibung des Vorgangs                                                        | Bemerkungen                                                                |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Schmelzen von (Wasser-)Eis (und ev. wieder einfrieren)                           | selbst ausprobieren und testen                                             |
| 2   | Verbrennen von einem Stück Papier                                                | selbst ausprobieren und testen<br><b>Vorsicht! Verbrennungs-Gefahr!</b>    |
| 3   | Wasser kochen und den Dampf (Gas) an einem kalten Gegenstand kondensieren lassen | selbst ausprobieren und testen<br><b>Vorsicht! Verbrennungs-Gefahr!</b>    |
| 4   | Anzünden einer Kerze und brennen lassen                                          | selbst ausprobieren und testen<br><b>Vorsicht! Verbrennungs-Gefahr!</b>    |
| 5   | Erhitzen von Kerzen-Stücken mit / in Wasser                                      | selbst ausprobieren und testen<br><b>Vorsicht! Gefahr durch Verbrühen!</b> |
| 6   | Abkühlen lassen der Produkte von Nr. 5                                           | selbst ausprobieren und testen                                             |
| 7   | Lösen von Zucker in Wasser (und ev. wieder verdunsten lassen)                    | selbst ausprobieren und testen                                             |
| 8   | Anstecken einer Wunderkerze                                                      | selbst ausprobieren und testen<br><b>Vorsicht! Verbrennungs-Gefahr!</b>    |
| 9   | Lösen von Fett (Öl) auf Wasser unter Zuhilfenahme eines Geschirrspülmittels      | selbst ausprobieren und testen                                             |
| 10  | Leuchten einer Lampe im elektrischen Stromkreis                                  | selbst ausprobieren und testen<br>z.B. mit einer Taschenlampe              |
| 11  | Aufbrühen von Kaffee-Pulver und abfiltrieren der Lösung                          | selbst ausprobieren und testen<br><b>Vorsicht! Gefahr durch Verbrühen!</b> |
| 12  | Aufladen eines Akku's                                                            |                                                                            |
| 13  | Kochen eines rohen Ei                                                            | selbst ausprobieren und testen<br><b>Vorsicht! Gefahr durch Verbrühen!</b> |
| 14  |                                                                                  |                                                                            |

| Vorgang / Sachverhalt                                            | Veränderungen / Beobachtungen                        | Vorgangs-Art          |           |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------|-----------|
| Schmelzen von Eis                                                | Übergang vom festen in den flüssigen Aggregatzustand | physikalisch          |           |
| Verdunsten von Wasser                                            | Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand    | physikalisch          |           |
| Sieden von Wasser                                                | Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand    | physikalisch          |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
| Entladung der Atmosphäre (bei einem Gewitter)                    | Blitze und Donner                                    | physikalisch          |           |
| Leuchten eines Stoffes (in der Flamme / nach dem Erhitzen)       | Abgabe von Licht in bestimmter Farbe                 | physikalisch          |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
| Lösen von Salz in Wasser                                         |                                                      | physikalisch/chemisch | Grenzfall |
| Erhitzen von Salz (bis zur Schmelze)                             |                                                      | physikalisch          |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
| Lösen von Zucker in Wasser                                       |                                                      | physikalisch          |           |
| Erhitzen von Zucker (bis zum Braun- bzw. Schwarzwerden)          |                                                      | chemisch              |           |
| Erhitzen von Schwefel (bis zum Braunwerden)                      |                                                      | physikalisch          |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
| Bildung eines Amalgam (Lösen eines Metalls in Quecksilber)       |                                                      | chemisch/physikalisch | Grenzfall |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
| Schmelzen von Kerzenwachs                                        |                                                      | physikalisch          |           |
| Brennen einer Kerze                                              |                                                      | chemisch              |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
| Farbveränderung eines Indikators in Anwesenheit z.B. einer Säure |                                                      | chemisch              |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
| Herstellen von Bronze (Schmelzen von Kupfer und Zinn)            |                                                      |                       |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
| Bräunung von Fleisch beim Anbraten                               |                                                      | chemisch              |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |
| Farbigwerden der Blätter im Herbst                               |                                                      | chemisch              |           |
|                                                                  |                                                      |                       |           |

---

## 5.1. Teilchen- und Stoß-Theorie der chemischen Reaktion

Die Entwicklung der Vorstellungen über das Wesen und den Ablauf von chemischen Reaktionen geht bis ins Mittelalter zurück.

### 5.1.1. die Stoß-Theorie

Die Stoß-Theorie wird oft auch als Kollisions-Hypothese in den Lehrbüchern geführt.

Die Theorie basiert sachlich auf den antiken Vorstellungen vom Aufbau der Stoffe aus kleinen Teilchen, die Atome genannt wurden. Dabei handelt es sich noch nicht um das Gebilde, was wir heute als Atom verstehen. Vielmehr hatten, laut den antiken Denkern, die Teilchen eines Stoffes immer eine charakteristische Form, die bestimmte Eigenschaften des Stoffes in der Minimal-Form beinhalteten. So könnte eben Kochsalz aus kleinsten farblosen Würfeln bestehen.

Als allgemeine Form hat sich in der Chemie die Kugel bewährt. Sie kann sowohl ein Atom im heutigen Sinn als auch ein komplexes (völlig anders geformtes) Molekül repräsentieren.

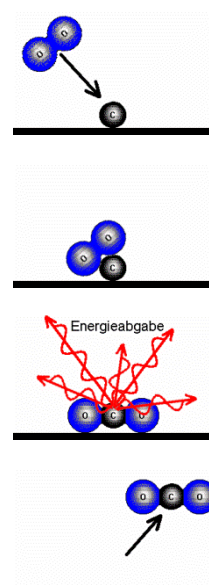
Zu mindestens bei Reaktionen mit zwei Stoffen, war schnell klar, dass es einen Kontakt der beiden geben muss, damit die Reaktion von statten gehen kann

Ausgangspunkt unserer Betrachtungen sind Stoffe, in denen sich die Teilchen relativ frei bewegen können. Dies trifft für Flüssigkeiten und Gase zu. Für die ersten Betrachtungen der Stoß-Theorie reicht es auch aus, wenn nur die Teilchen eines Stoffes frei beweglich ist. Der andere (Fest-)Stoff kann dann von den beweglichen Teilchen durch deren Eigenbewegung erreicht werden. Reine Feststoff-Reaktionen sind sehr selten und können erst einmal als Sonderfall betrachtet werden.

In Flüssigkeiten oder Gasen bewegen sich die Teilchen aufgrund der BROWNSchen Molekular-Bewegung (Wärme-Bewegung der Teilchen, → [2.2. Teilchen-Bewegung](#)) mehr oder weniger zufällig im Raum.

#### **Ablauf (heterogener Reaktionen an Grenzflächen):**

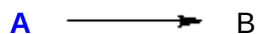
- **Andiffusion** der Ausgangsstoffe aus dem Phasen-Inneren an die Grenzfläche (Zuwanderung)
- **Adsorption** der Ausgangsstoffe an der Grenzfläche (Anhaftung)
- **Umsatz** der Ausgangsstoffe zu Reaktionsprodukten (chemische Reaktion)
- **Desorption** der Reaktionsprodukte von der Grenzfläche (Ablösung)
- **Abdiffusion** der Reaktionsprodukte in das Phasen-Innere (Abwanderung)



### 5.1.1.1. Arten von Teilchen-Zusammenstößen

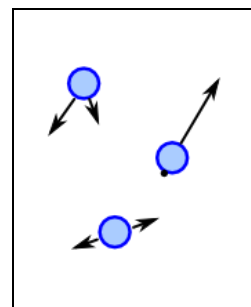
#### monomolekulare Ausgangsstoff-Situation

Auch wenn es auf den ersten Blick nicht so scheint, die Reaktionen, welche nur von einem Teilchen ausgehen, benötigen ebenfalls Teilchen-Kontakte.



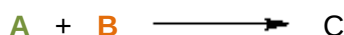
Dies wird uns aber erst klar, wenn wir auch etwas über die notwendige Energie (Aktivierungs-Energie) für eine Reaktion wissen. Davon "weiss" aber die ursprüngliche Stoß-Theorie noch nichts. Deshalb ignorieren wir die Stoß-Situation im monomolekularen Fall einfach erst einmal.

Praktisch benötigen die Teilchen eine bestimmte Energie, damit sie reagieren (zerfallen) können. Diese erhalten sie z.B. durch Stöße von anderen Teilchen.

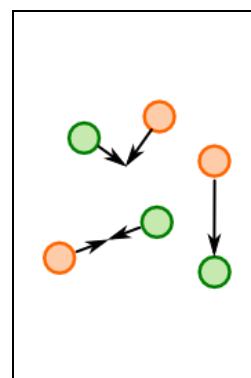


#### bimolekulare Ausgangsstoff-Situation

Die Situation, dass sich die Teilchen von zwei reagierenden Stoffen treffen, ist quasi der Standard-Fall in der Chemie. Um zu reagieren, müssen sich die beiden reagierenden Teilchen direkt treffen.



Wie der Zusammenprall dann weiter abläuft, ist hier noch nicht wirklich wichtig. Dabei spielt die Energie des Zusammenstoßes eine Rolle. Aber das gehört hier noch nicht her.



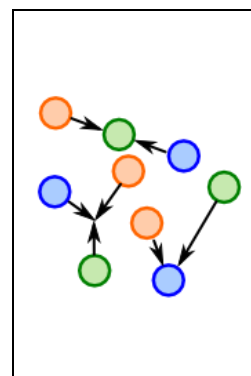
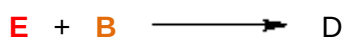
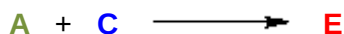
#### trimolekulare Reaktionen

Theoretisch kann man sich einen gleichzeitigen Zusammenstoß der Teilchen von drei verschiedenen Stoffen natürlich genauso gut vorstellen, wie den von zwei. In der Realität kommt eine solche Situation schon sehr selten vor.



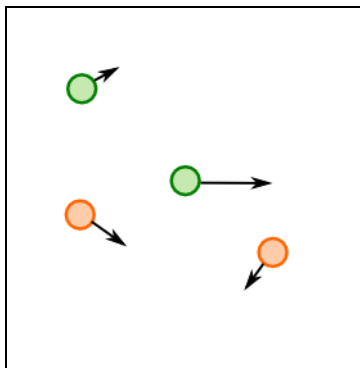
Bei der genauen Untersuchung von Reaktionen – bei denen scheinbar drei Teilchen miteinander reagieren haben gezeigt, dass es sich meist um Reaktionen handelt, bei mehrschrittig ablaufen. D.h. zuerst reagieren zwei Teilchen miteinander und dann reagiert das (Zwischen-)Produkt mit dem dritten.

Also sind es z.B. zwei bimolekulare Reaktionen hintereinander.

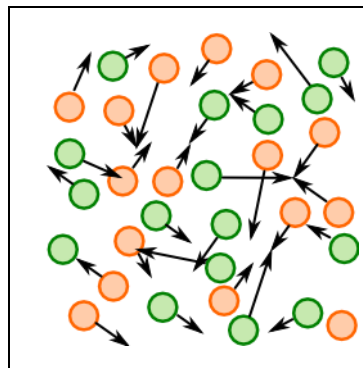


Die Stoß-Häufigkeit  $Z$  gibt die Anzahl der Zusammenstöße  $x$  bezogen auf das Stoff-Volumen  $V$  und der betrachteten Zeit  $t$  wieder.

$$Z = \frac{x}{V \cdot t}$$



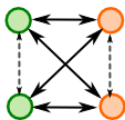
Ganz offensichtlich hängt die Anzahl der Stöße von der Anzahl der Teilchen in dem Volumen ab. Mehr Teilchen im Volumen bedeuten unweigerlich mehr Zusammenstöße (rechte Abb.), wenn die Teilchen dagegen stark ausgedünnt sind, werden auch die Zusammenstöße deutlich seltener (linke Abb.).



### 5.1.1.2. Wahrscheinlichkeit von Stößen in Abhängigkeit von der Teilchen-Anzahl

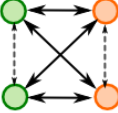
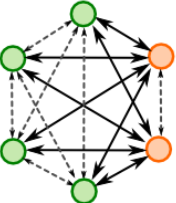
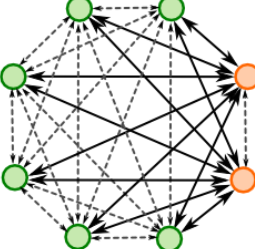
Unsere ersten klassifizierenden Betrachtungen gingen noch von idyllischen Situationen aus. Die betreffenden Teilchen treffen sich einfach – und gut. Aber so einfach ist es gar nicht.

Wir schauen uns in der Folge nur den häufigsten Fall, eine chemische Reaktion zwischen zwei verschiedenen Stoffen an. Die möglichen Zusammenstöße unterscheiden sich auch hinsichtlich der Reaktions-Partner. Zwischen Teilchen der gleichen Art kommt es zu **uneffektiven Stößen**, da diese nicht miteinander reagieren können. Die Teilchen verschiedener Art können **effektive Stöße** vollziehen, d.h. bei ihrem Zusammentreffen könnte es zu einer chemischen Reaktion kommen.

|                                       |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       |  |  |  |
| Teilchen <b>Grün</b>                  | <b>2</b>                                                                          | <b>3</b>                                                                           | <b>4</b>                                                                            |
| Teilchen <b>Orange</b>                | <b>2</b>                                                                          | <b>3</b>                                                                           | <b>4</b>                                                                            |
| verschiedene mögliche Stöße insgesamt | <b>6</b>                                                                          | <b>15</b>                                                                          | <b>28</b>                                                                           |
| mögliche effektive Stöße              | <b>4</b>                                                                          | <b>9</b>                                                                           | <b>16</b>                                                                           |
| uneffektive Stöße                     | 2                                                                                 | 6                                                                                  | 12                                                                                  |
| verschiedene Stöße je Teilchen        | 3                                                                                 | 5                                                                                  | 7                                                                                   |
| effektive Stöße je Teilchen           | 2                                                                                 | 3                                                                                  | 4                                                                                   |
| uneffektive Stöße je Teilchen         | 1                                                                                 | 2                                                                                  | 3                                                                                   |

Vernachlässigt man den verfügbaren Raum und die benötigte Zeit, dann spielt die Anzahl der Teilchen zumindestens für die Anzahl der möglichen Stoß-Kombinationen eine wichtige Rolle. Die Zahlen der effektiven und der uneffektiven Stöße je Teilchen steigen linear mit der Teilchen-Anzahl. Der um ein Teilchen kleine Anzahl uneffektiver Stöße spielt nachher bei x-Millionen Teilchen in einem Reaktions-Gefäß keine Rolle mehr.

Interessant wird das Ganze, wenn man von ungleichmäßigen Teilchen-Zahlen ausgeht.

|                                       |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       |  |  |  |
| Teilchen <b>Grün</b>                  | <b>2</b>                                                                          | <b>4</b>                                                                          | <b>6</b>                                                                            |
| Teilchen <b>Orange</b>                | <b>2</b>                                                                          | <b>2</b>                                                                          | <b>2</b>                                                                            |
| verschiedene mögliche Stöße insgesamt | 6                                                                                 | 15                                                                                | 28                                                                                  |
| mögliche effektive Stöße              | 4                                                                                 | 8                                                                                 | 12                                                                                  |
| uneffektive Stöße                     | 2                                                                                 | 7                                                                                 | 16                                                                                  |
| verschiedene Stöße je Teilchen        | <b>grün: 3 orange: 3</b>                                                          | <b>grün: 5 orange: 5</b>                                                          | <b>grün: 7 orange: 7</b>                                                            |
| effektive Stöße je Teilchen           | <b>grün: 2 orange: 2</b><br>( $\Sigma=4$ )                                        | <b>grün: 2 orange: 4</b><br>( $\Sigma=6$ )                                        | <b>grün: 2 orange: 5</b><br>( $\Sigma=7$ )                                          |
| uneffektive Stöße je Teilchen         | <b>grün: 1 orange: 1</b><br>( $\Sigma=2$ )                                        | <b>grün: 3 orange: 1</b><br>( $\Sigma=4$ )                                        | <b>grün: 5 orange: 1</b><br>( $\Sigma=6$ )                                          |

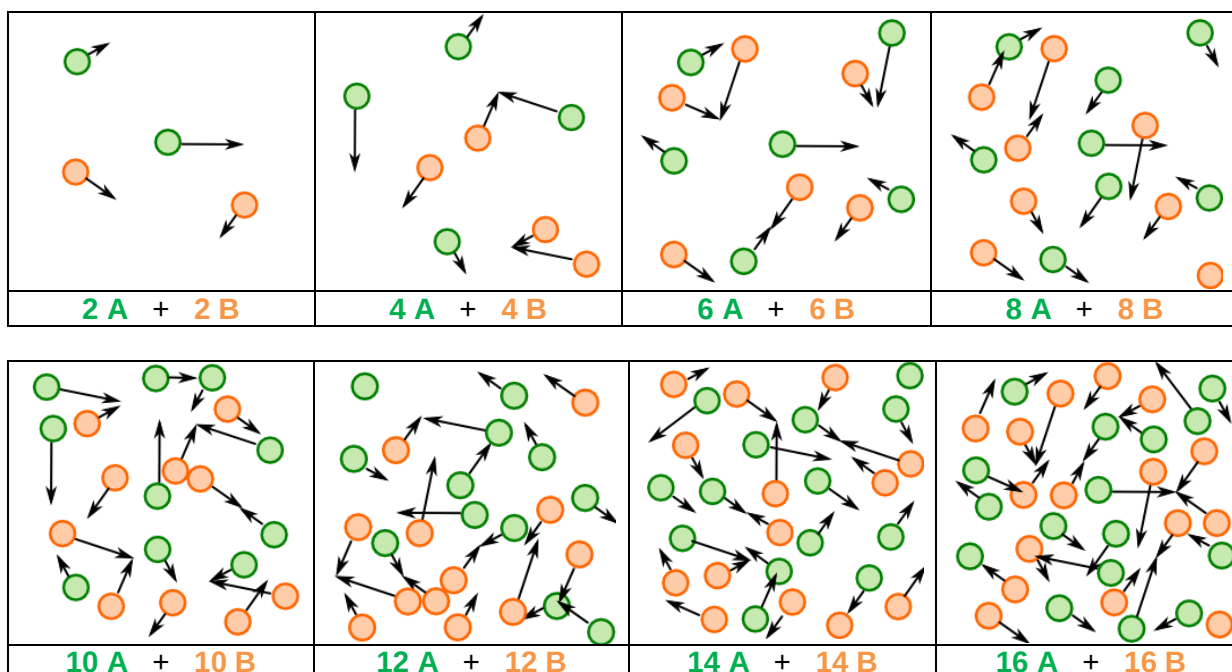
Zwar steigen die effektiven und uneffektiven Stöße auch mit der Anzahl der variierten Teilchen, aber es kommt nicht mehr zu einem linearen Zusammenhang. Trotzdem wird der ungleichmäßige Einsatz der Stoffe – gerade im technischen Bereich – häufig verwendet. Man nimmt einfach den billigeren Stoff und setzt ihn verstärkt ein, dann erhält man auch eine verstärkte Reaktion. Zwar nicht so stark, wie man es bei einer gleichmäßigen Steigerung beider Teilchen-Arten erwarten könnte, aber in der Produktion spielen die Kosten oft eine sehr große Rolle. Ein Nebeneffekt ist eine weitgehende Umsetzung des anderen (teureren) Stoffes, da die überschüssigen anderen (billigeren) Teilchen fast garantiert mal mit einem (teureren) zusammentreffen und auch irgendwann mal reagieren können.

Aus der praktischen Erfahrung weiss man, dass nicht alle effektiven Stöße zu einer chemischen Reaktion führen. Diesen Sachverhalt können wir mit der Stoß-Theorie nicht weiter klären.

### **5.1.1.3. Wahrscheinlichkeit von Stößen in Abhängigkeit vom verfügbaren Raum**

Eben haben wir den verfügbaren Raum und die benötigte Zeit einfach ausgeklammert. Das können wir natürlich nicht ewig machen. In den nächsten Variationen verwenden wir das gleiche Volumen – hier ersatzweise die gleiche Fläche – und lassen die Teilchen auch nur noch die gleiche Zeit miteinander interagieren.



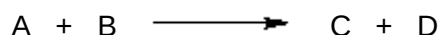


Schon beim Betrachten der Abbildungen wird deutlich, dass sich die Chancen auf ein Zusammentreffen deutlich erhöhen, je mehr Teilchen im Raum zu finden sind (→ Konzentration).

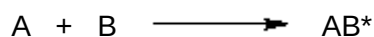
### 5.1.2. die Theorie des Übergangszustandes

Ob die effektiven Stöße dann wirklich zu einer Reaktion führen, hängt auch von der verfügbaren Energie der Teilchen ab. Haben die Teilchen z.B. zusammen nur eine sehr geringe Energie, werden sie nicht reagieren, sondern sich wieder voneinander abstoßen (wie z.B. Billardbälle). Haben sie dagegen die notwendige Energie, dann wird es zur Umwandlung kommen. Diese Sachverhalte versucht die Theorie des Übergangszustandes (EYRING-Theorie, Transition State Theorie (TST)) zu erklären.

Wir gehen dabei wieder von einer allgemeinen chemischen Reaktion aus, die nach einem bimolekularen Muster abläuft:



A und B müssen sich zuerst einmal treffen (Stoß-Theorie), bei ausreichendem Energie-Inhalt bilden die reagierenden Teilchen so eine Art Zwischen-Gebilde (Übergangs-Objekt bzw. -Teilchen) diese Zwischen-Objekte befinden sich im sogenannten Übergangszustand das Zwischen-Teilchen befindet sich in einem sehr Energie-reichen Zustand. Diesen kennzeichnen wir durch ein kleines Sternchen im Exponenten. In einigen Schriftwerken wird auch eine Raute (#) statt dem Sternchen benutzt.



aus diesem Zustand heraus gibt es zwei mögliche Auswege;

1. der Komplex bildet sich zu C und D um (reagiert also)  
 oder  
 2. der Komplex zerfällt wieder in die beiden Ausgangsstoffe A und B ohne zu reagieren



zusammengefasst ergibt sich das Formel-Bild:



Die Existenz des Übergangszustandes ist i.A. extrem kurzweilig. Erst in jüngster Zeit konnte man durch Spezial-Methoden (Foto's mit RÖNTGEN- und Laser-Blitzen) den Übergangszustand nachweisen

aus heutiger Sicht ist auch immer die entgegengesetzte Reaktion möglich, was dann als chemisches Gleichungs-Konstrukt so aussehen würde



Mit der Annahme das  $AB^*$  und  $CD^*$  praktisch sowieso nur sehr kurzlebig sind und sie gewissermaßen eine ähnlichen bis gleichen Zustand darstellen; ev. sind sie sogar identisch



kann man dann schreiben



oder verkürzt:



### 5.1.3. der typische Reaktions-Ablauf

#### (Kombination der Stoß-Theorie mit der Theorie des Übergangs-Zustandes)

Für erste Betrachtungen gehen wir hinsichtlich des Ablaufes einer chemischen Reaktion von der einfachen Stoß-Theorie aus. Zum Zeitpunkt des Zusammenstoßes erinnern wir uns dann an die Erkenntnisse aus der Theorie des Übergangszustandes und lassen den Energie-Inhalt der Teilchen mit einfließen.

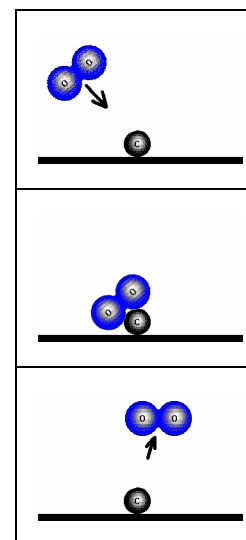
#### der einfache Zusammenstoß

Bedingt durch ihre innere Energie bewegen sich Teilchen und stoßen konsequenterweise irgendwann mal zusammen. Zur vereinfachten Betrachtung soll nur ein Teilchen (ein Sauerstoff-Molekül) eine Bewegung ausführen, das andere beteiligte Teilchen (ein Kohlenstoff-Atom) liegt an / auf einer Oberfläche.

Bewegt sich das Sauerstoff-Molekül langsam – hat es also nur einen kleinen Energie-Betrag, dann führt der Zusammenstoß mit dem C-Atom zu keiner Veränderung. Das  $O_2$ -Molekül wird – quasi wie ein Gummiball – einfach weggestoßen. Normalerweise kommt es auf Grund von Reibungen und Energie-Übertragungen zum Energie-Verlust beim zurückgestoßenen Teilchen.

Beide Teilchen bleiben unverändert. Es entsteht kein neuer Stoff. Somit hat auch keine chemische Reaktion stattgefunden.

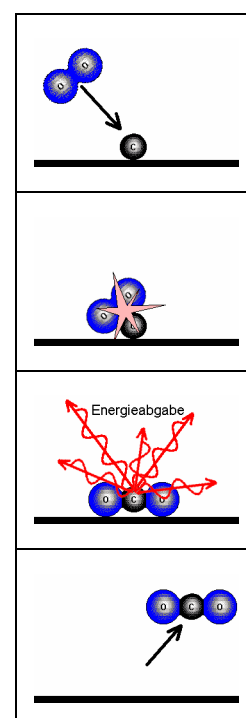
Da bei dem Zusammenstoß praktisch nichts chemisches passiert, sprechen wir von einem uneffektiven Zusammenstoß.



#### der effektive Zusammenstoß

Anders verhält es sich, wenn der Zusammenstoß mit mehr Energie verbunden ist. In unserem Beispiel bewegt sich das Sauerstoff-Molekül dabei schneller. Der Zusammenstoß mit dem Kohlenstoff-Atom ist mit so viel Energie verbunden, dass z.B. die Bindung im Sauerstoff-Molekül aufgebrochen und die Elektronen der Sauerstoff- und des Kohlenstoff-Atoms neu anordnen werden. Es entstehen in der Folge neue Bindungen. Wir nennen solche Zusammenstöße dann auch effektiv.

Grundsätzlich kommt es nun zu einer Energie-Abgabe. In welcher Form die Energie abgegeben wird, ist von diversen Umgebungsbedingungen abhängig. Ob der abgegebene Energie-Betrag größer oder kleiner als der aufgenommene ist, hängt von den konkreten Stoffen ab. Im Falle der Reaktion von Kohlenstoff mit Sauerstoff – also einer Oxidation – ist die Energie-Abgabe sogar sehr beachtlich (Verbrennung). Das gebildete Reaktions-Produkt kann nun ev. mit einem Anteil der Energie in Bewegung versetzt werden.



Einige Aspekte des energetischen Verlauf's einer chemischen Reaktion kann man mit Hilfe des nebenstehenden Modell's nachvollziehen.

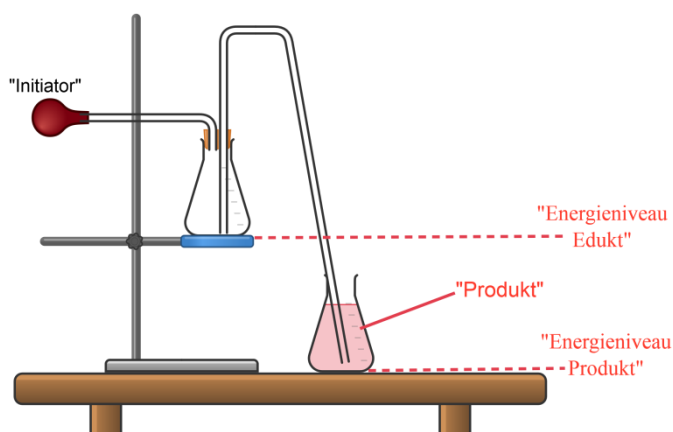
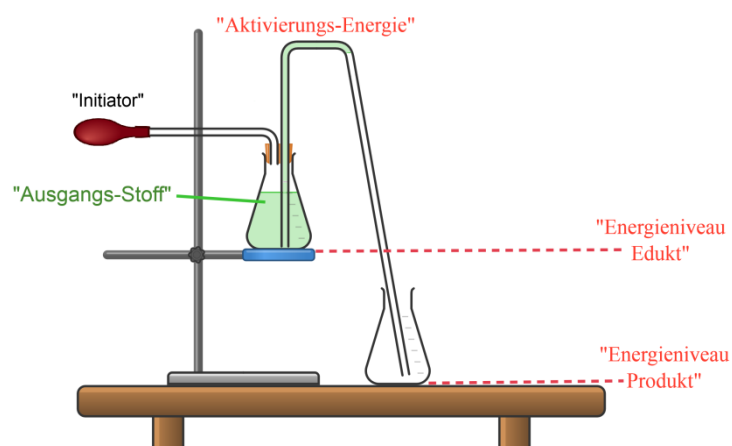
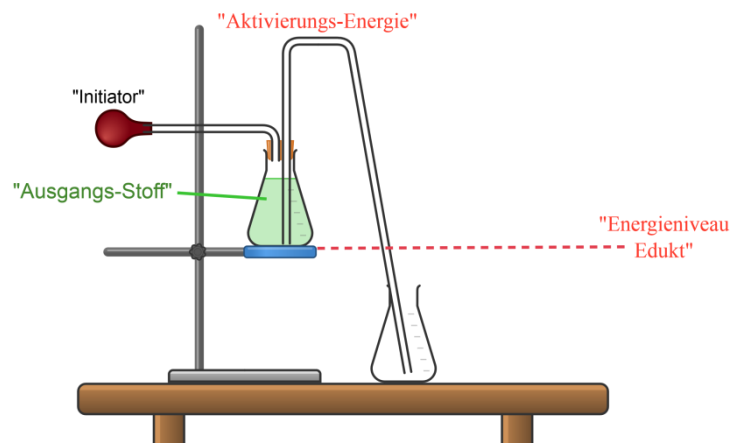
Der Ausgangsstoff hat ein bestimmtes Energie-Niveau. Im Modell ist dies die Flüssigkeit im oberen ERLENMEYER-Kolben. Die Höhe des Kolbens steht für die Energie des Stoffes (= potentielle Energie). Von sich aus kann die Flüssigkeit nicht in den unteren Kolben fließen.

Dieser steht für die Reaktions-Produkte. Zum Auslösen einer echten chemischen Reaktion würden wir vielleicht etwas Wärme zuführen. Diese Energie-Zufuhr soll durch die Ball-Pumpe dargestellt werden.

Drückt man nun die Ball-Pumpe, dann gelangt Flüssigkeit in den oberen Bogen. Dieser Bogen stellt die für die Reaktion notwendige Energie dar. Wenn genügend Flüssigkeit in den Bogen gelangt ist, dann fließt die Flüssigkeit in den unteren Kolben.

Die Ball-Pumpe ist quasi der Auslöser / der Initiator der Reaktion. Der Vorgang selbst läuft völlig eigenständig ab. Auch ein größerer ERLENMEYER-Kolben mit deutlich mehr Flüssigkeit würde die gleiche – relativ geringe – Energie-Zufuhr benötigen, um dann letztendlich abzufließen.

Am Ende ist die Flüssigkeit im unteren Kolben angekommen. Hier hat sie nun ein geringeres Energie-Niveau (geringere potentielle Energie)



### Aufgaben:

1. Überlegen Sie sich, wie das Modell abgeändert werden muss, wenn die Reaktion schon bei Normal-Bedingungen abläuft!
2. Kann auch eine Rück-Reaktion mit dem Modell veranschaulicht werden? Machen Sie einen Vorschlag oder erläutern Sie, warum das nicht geht!

## 5.2. die Thermodynamik chemischer Reaktionen



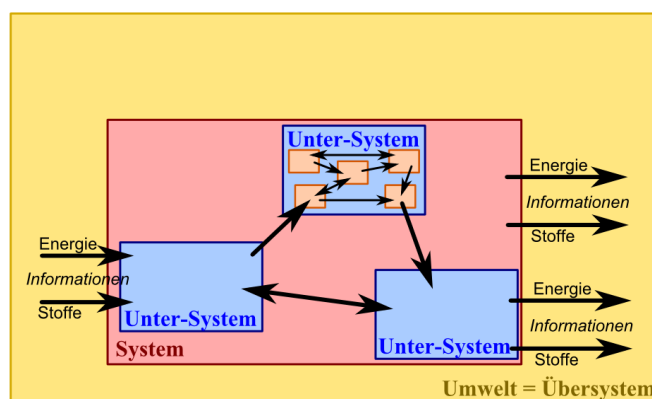
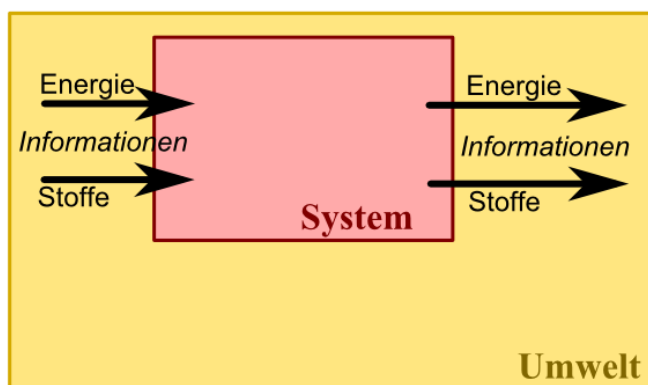
Die energetische Betrachtung von chemischen Reaktionen erfolgt in der Thermodynamik. Da wir hier praktisch nur von Energien und Energie-Umwandlungen sprechen, hat die chemische Thermodynamik viel mit der physikalischen gemein. Wir befinden uns hier praktisch im Übergangsbereich zwischen Chemie und Physik.

In der Thermodynamik spricht man sehr häufig von Systemen. Dieser Begriff wird auch in anderen Wissenschaften und Lebensbereichen verwendet. Dabei geht die Spannweite z.B. vom Periodensystem der Elemente über Baukasten-System bis zum Farb-System. Die Systeme in der Chemie sind i.A. Reaktionen oder nahe verwandte Vorgänge aus dem Bereich der Physik (z.B. bestimmte Lösungs-Vorgänge).

Die exakte Abgrenzung von System und Umwelt ist nicht immer möglich. Vielfach werden unterschiedliche beobachtbare Merkmale dazu herangezogen. An den System-Grenzen ändern sich meistens mehrere Merkmale deutlich.

In problematischen Fällen muss künstlich eine Grenze gezogen werden. Ökosysteme sind Beispiele dafür. Praktisch existieren dort keine Grenzen. Wo fängt z.B. ein See genau an? Was gehört vom Uferbereich, Seeboden oder dem Wellenbereich noch zum See?

Zur sinnvollen Bearbeitung werden dann Grenzen definiert, die aber auch nicht selten fließend sind.



### Definition(en): System

Ein System ist ein (ev. künstlich) abgegrenztes Ganzes, das aus mehreren verschiedenen Einzelteilen / Elementen besteht.

Ein abgegrenztes, künstliches oder natürliches Gebilde aus verschiedenen Komponenten bezeichnet man als System.

Schon bei wenigen verknüpften und voneinander abhängigen Untersystemen erhält man ein nicht mehr triviales Gesamt-System-Verhalten. Ein schönes Beispiel für ein System könnte ein Fahrrad sein. Es besteht aus vielen Elementen – einige davon könnten auch als Untersysteme durchgehen. Legt man alle Elemente zusammen, dann erhält man die Summe der Leistungen der Elemente. Wenn das System "Fahrrad" zusammengestellt ist, ergibt sich ein

völlig neues Leistungs-Potential, was man wohl auch den einzelnen Elementen oder deren einfachen Summe nicht zutrauen würde.

**Ein System ist immer mehr als die Summe seiner Bestandteile.**



**Aufgaben:**

- 1. Nennen Sie mindestens drei Objekte / Sachverhalte, die sich schon namentlich als System outen!**
- 2. Nennen Sie weitere Systeme mit einigen ihrer Bestandteile / Subsysteme!**
- 3. Prüfen Sie, ob es sich bei den folgenden Objekten um ein System handelt!**

| Objekt                                           | ?System | Bemerkungen |
|--------------------------------------------------|---------|-------------|
| Fahrrad                                          |         |             |
| Auto                                             |         |             |
| Atom                                             |         |             |
| in Folie eingeschweißte Apfel-Kiste (mit Äpfeln) |         |             |
| Sandhaufen                                       |         |             |
| Mensch                                           |         |             |
| Stadt                                            |         |             |
| Gemisch aus Eisen- und Schwefel-Pulver           |         |             |
| Gold-Barren                                      |         |             |
| Landwirtschaftsbetrieb / Bauernhof               |         |             |

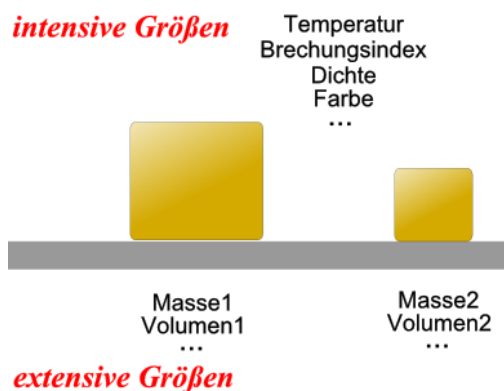
## 5.2.0. Grundlagen / Wiederholung aus der Physik

Alle Merkmale, die zur Beschreibung einer Situation (/ einem Zustand) eines Zustands-Größen dienen, heißen **Zustands-Größen**.

In chemischen Systemen unter thermodynamischer Sicht sind das vorrangig die schon bekannten physikalischen Größen **Masse m**, **Temperatur T**, **Volumen V** und der **Druck p**.

Daneben sind natürlich auch Farbe, pH-Wert, Geruch usw. usf. Zustands-Größen.

Viele Größen sind direkt mit der Größe des Systems verbunden. Diese nennen wir **extensive Zustands-Größen**.



Zu ihnen zählen die Teilchenzahl  $N$  bzw. die Stoffmenge  $n$  oder das Volumen  $V$ .

| extensive Größe       | Symbol | Einheit                                                   | Definition                  | Bemerkung(en) |
|-----------------------|--------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------|
| <b>Masse</b>          | $m$    | g kg t                                                    | SI-Einheit                  |               |
| <b>Volumen</b>        | $V$    | cm <sup>3</sup> dm <sup>3</sup> m <sup>3</sup><br>ml l hl | abhängig von der Körperform |               |
| <b>Stoffmenge</b>     | $n$    | mol                                                       | SI-Einheit                  |               |
| <b>innere Energie</b> | $U$    | J                                                         | $U = Q + W$                 |               |
|                       |        |                                                           |                             |               |

**Intensive Zustands-Größen** sind nicht von der Größe des Systems abhängig. Dazu gehören z.B. die Temperatur  $T$  und der Druck  $p$ .

| intensive Größe        | Symbol      | Einheit                                           | Definition               | Bemerkung(en)                                    |
|------------------------|-------------|---------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>Temperatur</b>      | $T$         | K                                                 | SI-Einheit               |                                                  |
|                        | $\vartheta$ | °C                                                | $\vartheta = T - 273,15$ |                                                  |
| <b>Druck</b>           | $p$         | Pa                                                | $p = \frac{F}{A_0}$      | 1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup><br>1 atm = 101,325 kPa |
| <b>Dichte</b>          | $\rho$      | g/cm <sup>3</sup> kg/dm <sup>3</sup><br>g/ml kg/l | $\rho = \frac{m}{V}$     |                                                  |
| <b>molare Masse</b>    | $M$         | g/mol                                             | $M = \frac{m}{n}$        |                                                  |
| <b>molares Volumen</b> | $V_M$       | l/mol                                             | $V_M = \frac{V}{n}$      |                                                  |
| <b>Heizwert</b>        | H HW        | kJ/kg                                             | $HW = \frac{Q}{m}$       |                                                  |
| <b>Konzentration</b>   | $c$         | mol/l                                             | $c = \frac{n}{V}$        | 1 M = 1 mol/l                                    |
|                        |             |                                                   |                          |                                                  |

Intensive Größen sind fast immer Quotienten verschiedener – häufig extensiver – Größen. Man unterscheidet spezifische und molare Größen.

**Spezifische Größen** sind Quotienten aus einer extensive Größe und der Masse als Bezugsgröße.

Wird als Bezugsgröße – also als Quotient (Teiler) – die Stoffmenge verwendet, dann spricht man von **molaren Größen**.

$$\text{spezifische Größe} = \frac{\text{extensive Größe}}{\text{Masse}}$$

$$\text{molare Größe} = \frac{\text{extensive Größe}}{\text{Stoffmenge}}$$

### Aufgaben:

1. Was versteht man unter einer SI-(Basis-)Einheit?
2. Erkunden Sie, ob und welche anderen Einheiten-Systeme benutzt werden!
3. Recherchieren Sie die aktuellen Definitionen für die SI-Einheiten Kelvin, Mol, Kilogramm und Meter!
4. Erstellen Sie sich eine Mindmap-ähnliche Übersicht, in der die extensiven Größen mehrere einzelne Zentral-Begriffe darstellen! Verbinden Sie diese dann mit geeigneten intensiven Größen! Im Schema dürfen nur die Namen der Größen, Formelzeichen, Einheiten und Definitions-Formeln auftauchen!

### 5.3.0.1. Energie als zentrale Größe in der Thermodynamik

Eine besondere Rolle spielt die Energie eines chemischen Systems. In jedem Zustand hat ein chemisches System eine bestimmte system-interne Energie. Diese als **innere Energie U** bezeichnete Energie ist die Summe aller im System vorhandenen Energie-Arten.

Mehrere Zustände eines Systems unterscheiden sich durch unterschiedliche Ausprägungen der Zustands-Größen. Mindestens eine Zustands-Größe muss zwischen zwei Zuständen geändert sein.

Um einen System-Zustand zu verändern, ist ein Prozess notwendig. Das kann z.B. ein äußerer Einfluss sein, wie eine Wärme-Zufuhr oder eine Druck-Erhöhung. Ein System kann aber aus sich selbst heraus seinen Zustand ändern. Denken wir da z.B. an eine auf einmal startende chemische Reaktion oder den radioaktiven Zerfall.

Die Veränderung eines Systems bedarf immer einer Zeit. Mit anderen Worten, ein System ist zu einem Zeit-Punkt nicht gleichzeitig in zwei Zuständen.

Alle Größen, die während einer Zustands-Änderung auftreten, werden **Prozess-Größen** genannt. Typisch sind in der Thermodynamik die **Wärme Q** ( $W_w$ ) und die **Arbeit W**.

#### **Definition(en): Zustands-Größe**

Zustands-Größen sind alle Merkmale / Eigenschaften / Charakteristika zur Beschreibung eines Systems.

#### **Definition(en): Zustand**

Ein Zustand ist die Beschreibung / Nennung / ... aller bzw. der relevanten Merkmale – und ihrer Ausprägungen – eines Systems, zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Auch wenn oft keine Veränderung von beobachtbaren Merkmalen mehr vorhanden sind, sind die meisten Systeme im Inneren noch aktiv. Man spricht allgemein von dynamischen Systemen. So ändern sich bei vielen chemischen Reaktionen mit gleichzeitig ablaufenden Hin- und Rück-Reaktionen ständig die Teilchenzahlen. Über die Zeit gleichen sich die Werte meist aber aus.



Ändern sich die äußeren Merkmale eines dynamischen Systems nicht mehr, dann spricht man einem System im (Fließ-)Gleichgewicht.

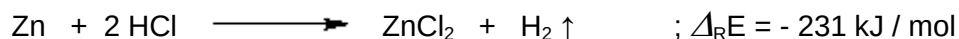
### Definition(en): Prozess

Ein Prozess ist der Verlauf / eine Entwicklung, die ein System (durch)macht. Prozesse sind durch Veränderungen der System-Zustände charakterisiert.

### Definition(en): Prozess-Grösse

Eine Prozess-Grösse ist ein Merkmal / Eigenschaft / Charakteristikum, dass nur während der Zustands-Änderung eines System beobachtet werden kann.

Prozess-Größen sind i.A. vom Weg bzw. der Art der Zustands-Änderung abhängig. Eine Einteilung von Systemen kann auf sehr unterschiedliche Art und Weise erfolgen. In der Thermodynamik ist vor allem der Stoff- und Energie-Austausch bedeutsam. Je nach Austausch-Möglichkeiten unterscheidet man **offene, geschlossene und isolierte Systeme**. Betrachten wir z.B. die Reaktion:



**stöchiometrische Gleichung**

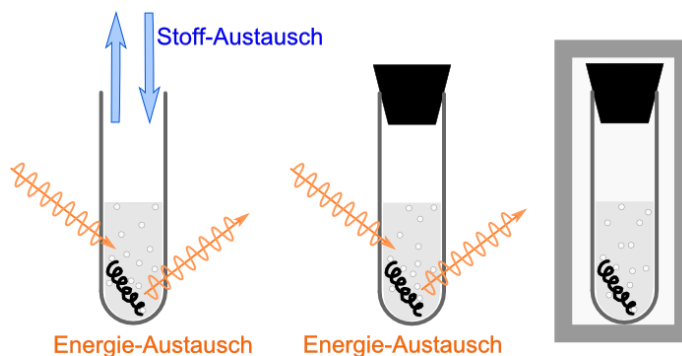
**thermochemische Gleichung**

Läuft die Reaktion in einem Reagenz-Glas ab, dann können Stoffe (hier Wasserstoff) und Energie (hier: Wärme) mit der Umgebung ausgetauscht (hier: nur abgegeben) werden. Solch ein System ist **offen**.

Wird das Reagenz-Glas mit einem Stopfen versehen oder anderweitig verschlossen, dann kann kein Stoff mehr ausgetauscht werden. Die Energie kann aber durch die Glaswände hindurch. Man spricht nun von einem **geschlossenen** System.

Bei einem **isolierten (abgeschlossenen)** System wird auch der Energie-Austausch unterbunden.

Isolierte Systeme sind vor allem theoretische Systeme, da ein Energie-Austausch letztendlich nicht vollständig verhindert werden kann. Durch geeignete Isolationen kann die Energie-Auf- bzw. -Abgabe aber weitgehend eingeschränkt werden.

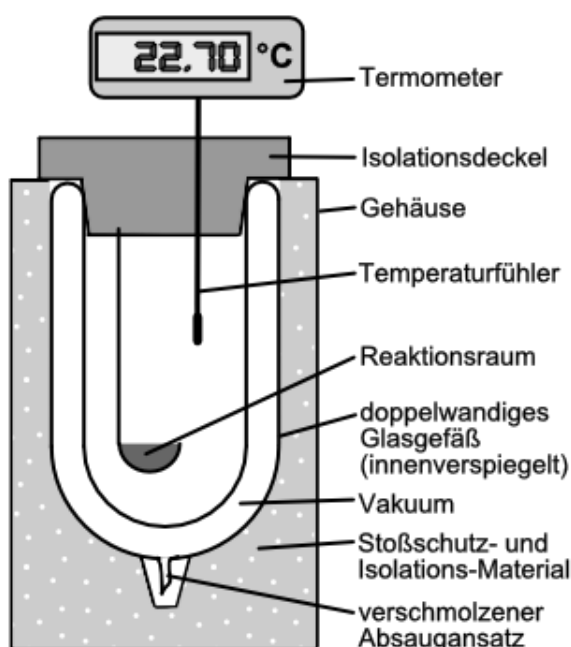


System-Arten

links: offenes System; mittig: geschlossenes System  
rechts: isoliertes System

Um chemische Reaktionen thermodynamisch zu verfolgen, verwendet man sehr häufig DEWAR-Gefäße. Praktisch handelt es sich um Thermoskannen (auch Isolierkannen genannt). Im Inneren des Gehäuses steckt ein doppelwandiges Glasgefäß, das innen verspiegelt ist. Im Raum zwischen den Doppelwänden wurde auch noch die Luft herausgesaugt. Es herrscht hier ein Vakuum.

Der Deckel ist oft ähnlich gebaut oder aus einem sehr gut Wärme-isolierendem Material – wie z.B. Kork.



DEWAR-Gefäß  
(Deutsches Museum München)  
Q: de.wikipedia.org (LepoRello)

Zur Aufnahme von Geräte-Halterungen sind im Deckel meist auch Löcher. In den klassischen DEWAR-Gefäßen war immer eine Öffnung für das Thermometer vorgesehen.

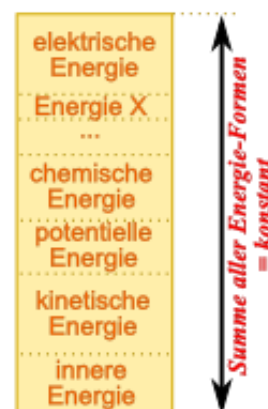
Heute sind nur noch dünne Löcher für die elektronischen Temperatur-Sensoren notwendig.

Für Reaktionen ohne Beteiligung von Gasen sind die DEWAR-Gefäße schon recht gut als isolierte Systeme zu betrachten.

Grundsätzlich gilt der Energie-Erhaltungssatz. Dieser sagt aus, dass die Summe aller Energien (in einem isolierten System bzw. insgesamt im Weltall) immer konstant ist.

Energie kann nicht verschwinden oder erschaffen werden, Energie lässt sich nur umwandeln.

Interessanterweise handelt es sich hier um **kein** (physikalisches) **Gesetz**. Es ist derzeit noch nicht bewiesen, dass die obige Aussage stimmt. Aber all unsere Alltags-Erfahrungen und die bekannten physikalischen Forschungen deuten auf die Richtigkeit des Energie-Erhaltungssatzes hin. Man nennt diesen Satz auch den **Ersten Hauptsatz der Thermodynamik** (1. HS). Die Umwandlung einer Energie-Form in eine andere ist immer mit einem Umwandlungs-Verlust verbunden. In den meisten Fällen wird quasi als Umwandlungs-Energie Wärme frei.



Man spricht auch gerne von Abwärme. Bei den Umwandlungen von einer Energie-Form in eine andere unterliegen diese noch weiteren physikalischen Gesetzen und Regeln.

Eine vollständige Rück-Umwandlung ist auch in einem isolierten System nicht möglich. Eine erneute Umwandlung würde wiederum mit einer Wärme-Abgabe verbunden sein.

Wärme lässt sich nicht vollständig in eine andere Energie-Form umwandeln.

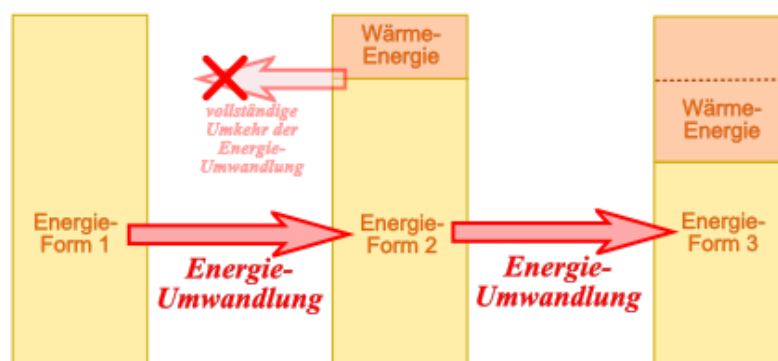
Es bleibt immer etwas (Rest-)Wärme übrig. Die Summe aller Energien bleibt aber immer gleich.

Der Begriff der Abwärme oder des Energie-Verlustes ist ein aus menschlicher Sicht bzw. ein sehr oberflächlich gebildeter Begriff. Dabei spielen die alltäglichen, phänomenologischen Erfahrungen in unserer Welt eine entsprechende Rolle. Die Umwandlungs-Wärme wird nicht immer merklich.

Die Effektivität der Umwandlung wird in der Physik und in der Technik als Wirkungsgrad  $\eta$  (griechischer Buchstabe eta) bezeichnet. Der Wirkungsgrad berechnet sich z.B.:

$$\eta = \frac{\text{Energie}_2}{\text{Energie}_1} = \frac{\text{Energie}_{\text{Nutzen}}}{\text{Energie}_{\text{Aufwand}}} = \frac{\text{Energie}_{\text{Ab}}}{\text{Energie}_{\text{Zu}}}$$

Ersatzweise kann statt der Energie auch die (physikalische) Arbeit  $W$  als Energie-Veränderung (Energie-Differenz) verwendet werden.



Energie-Umwandlungen sind immer mit "Energie-Verlusten" / Umwandlungs-Verlusten (Wärme-Energie) verbunden  
Energie-Form 3 kann auch wieder Energie-Form 1 sein

| Energie-Form              | Formel                                    |
|---------------------------|-------------------------------------------|
| potentielle Energie       | $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$             |
| kinetische Energie        | $E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$       |
| elektrische Energie       | $E_{elek} = U \cdot I \cdot t$            |
| Arbeit (Energie-Änderung) | $W = E_2 - E_1$<br>$W = F \cdot \Delta s$ |

| Energie-Form                | Formel                                   |
|-----------------------------|------------------------------------------|
| Licht- / Strahlungs-Energie | $E_{photon} = h \cdot f$                 |
| Rotations-Energie           | $E_{rot} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$ |
|                             |                                          |

Die Energie ist tatsächlich der Stoff, aus dem alle Elementarteilchen, alle Atome und daher überhaupt alle Dinge gemacht sind, und gleichzeitig ist die Energie auch das Bewegende.  
Werner HEISENBERG

### Definition(en): Energie

Energie ist die physikalische Größe, die Veränderungen an Objekten (Vergrößern, Verkleinern) oder ihrem Verhalten (Bewegung, ...) bewirkt.

Energie ist die physikalische Größe, die für die Verrichtung von Arbeit notwendig ist.

### Definition(en): Wärme

Wärme ist die Energie, die aufgrund einer Temperatur-Differenz zwischen einem System und seiner Umgebung ausgetauscht wird.

In Teilchen-Systemen kann man die Wärme als (übertragbare) Bewegungs-Energie der Teilchen (Atome und Moleküle) verstehen.

### Definition(en): Temperatur

Die Temperatur ist das Maß für die mittlere kinetische Energie (Bewegungs-Energie) der Teilchen eines Körpers / eines Systems.

Als Formel-Zeichen werden üblicherweise  $\vartheta$  (griechischer Buchstabe theta) für die Angabe in °C (CELCIUS-Temperatur-Skala) oder T für die Angabe als absolute Temperatur in K der KELVIN-Temperatur-Skala angegeben.  
Die Temperatur ist nicht von einem Körper auf den anderen übertragbar!

In Teilchen-Systemen kann man die Wärme(-Energie) als Bewegungs-Energie der Teilchen (Atome und Moleküle) verstehen.

Die Temperatur ist der Wärme-Zustand eines Körpers / eines Systems.



Für technische Zwecke, wie z.B. das Heizen kann man von den brennbaren Stoffen den Heizwert und den Brennwert berechnen. Der Heizwert HW (auch unterer Heizwert  $HW_u$ , auch:  $H_u$ ) gibt an, wieviel der bei der Verbrennung freiwerdende Energie lässt sich als Wärme(-menge) nutzen, ohne dass es zu Kondensationen von Verbrennungs-Produkten (hier Wasser) kommt.

Der Brennwert  $H_s$  (kalorischer Brennwert od. oberer Heizwert  $HW_o$ , auch:  $H_o$ ) ist dagegen die Wärmemenge, die bei der Verbrennung eines Stoffes und der anschließenden Abkühlung der Verbrennungs-Produkte auf 25 °C einschließlich deren Kondensation freigesetzt wird. Bei exothermen Reaktionen ist der Brennwert der Absolut-Betrag der Standard-Verbrennungs-Enthalpie  $\Delta_c H^\circ$ . Diese Korrektur ist notwendig, da per Definition Energie-Abgaben mit einem negativen Vorzeichen versehen werden. Natürlich sind dies keine negativen Energien! So etwas gibt es nicht.

Brenn- und Heiz-Wert haben mit J/g (bzw. kJ/kg) die gleiche Einheit.

Der Heizwert von Wasser-freien Brennstoffen ist immer (deutlich) geringer, als deren Brennwert.

### **Aufgaben:**

- 1. Vergleichen Sie allgemein offene, geschlossene und isolierte Systeme in einer geeigneten Tabelle!***
- 2. Geben Sie jeweils 5 Beispiele für (vorrangig) physikalische und chemische Energie-Umwandlungen an! Kennzeichnen Sie die verschiedenen Arten der Energie bei den Vorgängen!***
- 3. Finden Sie für die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff unterschiedliche Formen der Energie-Umsetzung! Bei welcher Umsetzung kommt es bei gleicher Stöchiometrie zur größten Energie-Freisetzung? Begründen Sie Ihre Meinung / Rangfolge!***
- 4. Berechnen Sie den Wirkungsgrad einer elektrischen Maschine, die mit 60 W·h elektrische Energie gespeist wird und rund 37 W·h Wärme- und Licht-Energie abgibt!***
- 5. Was versteht man unter einem Perpetuum mobile? Welche Arten gibt es? Welche Maschinen werden z.B. als Perpetuum mobile vorgeschlagen? Setzen Sie sich mit der Möglichkeit der Realisierung und des andauernden Betriebes auseinander!***

Es ist wichtig, dass wir in der heutigen Physik *nicht* wissen, was Energie ist. Wir haben kein Bild davon, dass Energie in kleinen Klumpen definierter Größe vorkommt.  
Richard FEYNMAN

### **Energie-Prinzip von THOMSON und BERTHELOT ()**

Die Wärme-Tönung stellt ein Maß für die Affinität (Triebkraft) einer chemischen Reaktion dar. Die Systeme streben immer die – in der Situation möglichen – Energie-ärmsten Zustände an. Für die Gesamtheit aller Systeme gilt, dass letztendlich ein Minimum an Energie bzw. Wärme(-Inhalt) angestrebt wird.

### **interessante Links:**

<https://av.tib.eu/media/15605> (Video-Vortrags-Reihe zur Thermodynamik (1. Video))

## 5.2.1. einfache Thermodynamik chemischer Reaktionen



Die (chemische) Thermodynamik beschäftigt sich mit den energetischen Veränderungen, die während einer chemischen Reaktion auftreten. Dabei interessieren uns die Energien, die in den Stoffen drin stecken sowie die Energie-Mengen, die bei Reaktionen aufgenommen oder abgegeben werden.

Die Thermodynamik ist keine leichte Kost. Schon der Begriff Energie stellt uns vor große Verständnis-Probleme. Wer hat sie schon mal gesehen oder beobachtet? Wir können lediglich ihre Wirkungen fühlen, beobachten und messen.

Energie ist neben Raum, Zeit und Information einer der zentralen Begriffe in der Physik (Naturwissenschaft). Hier ist es die Größe, die trotz aller Zeit-Abhängigkeiten der Naturgesetze unverändert bleibt (eine Art Inhaltsgröße).

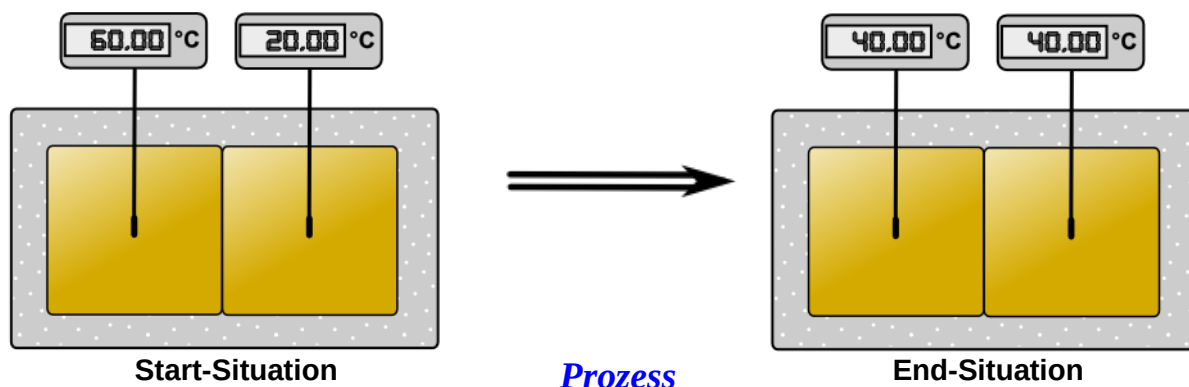
Definiert wird die Energie heute als abstrakte Größe zur Beschreibung von Veränderungen an und in Systemen. Energie kann nur umgewandelt werden. Es werden viele verschiedene Energieformen beschrieben, von denen:

- potentielle Energie (Lage-Energie)
- kinetische Energie (Bewegungs-Energie)
- elektrische Energie
- chemische Energie
- thermische Energie (Wärme(-Energie))

zu den bedeutendsten zählen. Vereinfacht – und populärer verständlich – wird Energie als das bezeichnet, was es einem System ermöglicht, Arbeit zu verrichten, Licht auszustrahlen, Wärme abzugeben, magnetische Felder aufzubauen usw. usf.

Die diversen Energie-Unterschiede sind die Ursache vieler physikalischen Vorgänge. Es wird immer ein Ausgleich der Energie-Differenzen (Potentiale, Gradienten) angestrebt.

Betrachten wir zwei gleichgroße Metall-Körper, die direkt nebeneinander liegen. Um Energie-Verluste auszuschließen, betrachten wir die beiden Blöcke zusammen als ein isoliertes System. Der eine Block (hier links) soll eine deutlich höhere Temperatur haben, als der andere. Aus der Alltagserfahrung wissen wir, dass sich die Temperaturen beider Blöcke angleichen werden. Unter den Bedingungen eines isolierten System's und bei gleich großen Blöcken wird die Misch-Temperatur genau der Mittelwert aus den beiden Temperaturen vor dem Prozess-Start sein.



An dieser End-Situation ändert sich in einem isoliertem System nichts mehr, egal wie lange wir warten würden.

Diesen Effekt bezeichnet man vielfach auch als den **Nullten Hauptsatz der Thermodynamik** (0. HS).

Unter Normalbedingungen (300 K = 27 °C) ist z.B. die elektrische und die chemische Energie mit einer der höchsten (organisiertesten / geordnetesten) Energieformen. Bei jeder Energie-Umwandlung entsteht immer mehr oder weniger Wärme. Wie wir noch sehen werden, kann aber die Wärme nicht wieder vollständig in eine andere Energie-Form umgewandelt werden. Deswegen wird die Wärme auch als eine niedrige Form der Energie betrachtet. Letztendlich wird nach unendlichen vielen Energie-Umwandlungen nur noch Wärme-Energie übrig bleiben, die dann völlig gleichmäßig im Universum verteilt ist (Tendenz-Richtung aller Energie-Umwandlungen). Mittlerweile werden auch andere Theorien diskutiert, die nicht vom Wärme-Tod des Universums ausgehen. Die theoretische Physik / Thermodynamik hat hier noch ein riesiges Spielfeld für die Forschung.

Als Formelzeichen verwenden wir für die Energie das E (seltener auch: W (Arbeit bzw. Wärme)). Die genormte SI-Einheit ist das **Joule** (Zeichen: J; gesprochen: *dschuhl*) nach dem Physiker James Prescott JOULE (1818 – 1889). Aus traditionellen Gründen kursieren und halten sich noch verschiedene andere Einheiten. Den Biologen, Chemikern und Trophologen liegt dabei besonders die Kalorie sehr nahe.

#### Umrechnungen und Namen weiterer Energie-Einheiten:

| Zeichen | ausgeschrieben<br>gesprochen       | Umrechnung(en)                                        | Zeich. | ausgeschrieben<br>gesprochen             | Umrechnung(en)                   |
|---------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------|------------------------------------------|----------------------------------|
| Nm      | Newton Meter<br><i>njutenmeter</i> | 1 Nm = 1 J                                            | erg    | <i>erg</i>                               | 1 erg = 0,1 * 10 <sup>-6</sup> J |
| Ws      | Watt Sekunde<br><i>wattsekunde</i> | 1 Ws = 1 VAs = 1 J<br>1 kWh = 3,6 * 10 <sup>6</sup> J | eV     | Elektronen Volt<br><i>elektronenvolt</i> | 1 eV = 1,6 * 10 <sup>-19</sup> J |
| cal     | Calorie<br><i>kalorie</i>          | 1 cal = 4,187 J                                       |        |                                          |                                  |
| SKE     | Steinkohlen-einheit                | 1 SKE = 29,3 MJ                                       |        |                                          |                                  |
|         |                                    |                                                       |        |                                          |                                  |

Dass Energie nicht geschaffen oder vernichtet werden kann, haben wir schon gesagt. In der Physik wird dieser Sachverhalt durch den Energie-Erhaltungssatz beschrieben. Ganz anders als sonst üblich, ist dieser Satz kein Gesetz. Der Energie-Erhaltungssatz (1. Hauptsatz der Thermodynamik) ist derzeit nicht beweisbar. Er gilt aber als der wichtigste Grundsatz der Naturwissenschaften. Bis heute ist aber noch kein einziger Verstoß gegen dieses Quasigesetz beobachtet worden. Nach unserem derzeitigen Erkenntnisstand gilt es auch im gesamten Universum.

Die innere Energie U haben wir schon als die Summe aller System-internen Energien definiert.

$$U = E_a + E_b + \dots E_z$$

In einem Stoff gehören zu den bestimmenden Energie-Formen die Bindungs-Energie, die Bewegungs-Energie und die Kern-Energie. Aber auch Kristallisations- und Dissoziations-Energien bestimmen den Gesamt-Betrag der inneren Energie. Derzeit gibt es keinen Ansatz, der es uns gestattet den Gesamt-Betrag der inneren Energie zu bestimmen. Wir können nur Energie-Differenzen messen.

$$\Delta U = U_{End} - U_{Start}$$

Für eine chemische Reaktion bedeutet das:

$$\Delta_R U = U_{RP} - U_{AS}$$



also, dass die Änderung der inneren Energie ( $\Delta_R U$ ) während einer Reaktion die Differenz zwischen der inneren Energie der Reaktions-Produkte ( $U_{RP}$ ) und der, der Ausgangs-Stoffe ( $E_{AS}$ ) ist. Diese Änderung der inneren Energie wird auch Reaktions-Energie  $E_{Reak}$  genannt.

### Definition(en): innere Energie

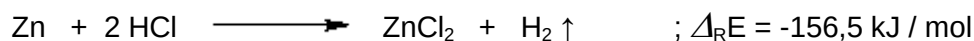
Die innere Energie ist die in einem System / Stoff vorhandene Gesamt-Energie.

Die innere Energie ist vorrangig / vereinfacht die Summe aus der Kern-Energie  $U_K$ , der chemischen Energie  $U_{chem}$  und der thermischen Energie  $U_{therm}$ .

### Reaktionen mit isochorer Prozess-Führung



Betrachten wir nun eine chemische Reaktion in einem (praktisch) isolierten System:



Die Masse des Zink's  $m[\text{Zn}]$  und der Salzsäure-Lösung  $m[\text{HCl}]$  messen wir vorher aus.

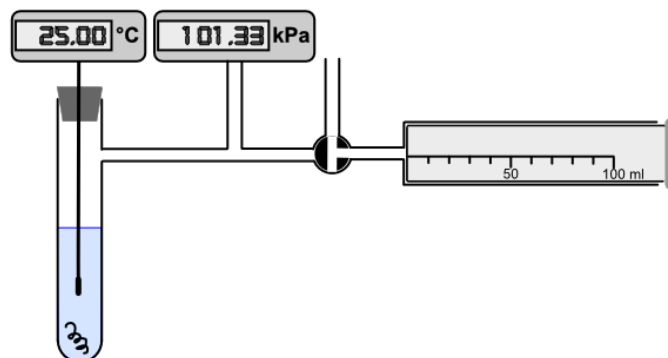
Wir starten bei 25 °C und 101,325 kPa – also bei Standard-Bedingungen.

Durch die gewählte Stellung des Drei-Wege-Hahn's ist keine Volumen-Veränderung möglich. Wir arbeiten hier **isochor**.

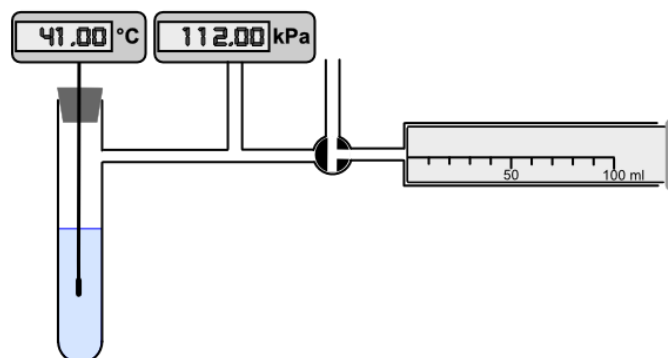
Der Verlauf der Reaktion zeigt sich an der intensiven Gas-Bildung und dem Verschwinden des Zink-Stückes. Desweiteren ändern sich die Anzeigen für die Temperatur und den Druck.

Es kommt also auch zu einer Energie-Freisetzung in Form von Wärme.

Ein Teil der Wärme kommt sicher aus der Reaktion selbst. Aber auch der steigende Druck im Reaktions-Gefäß lässt das System



Ausgangs-Situation



End-Situation



wärmer werden.

Mit Hilfe der Salzsäure-Masse, welche die größte Menge der freiwerdenden Energie aufgenommen hat, können wir nun die freigewordenen Wärmemenge  $Q$  ermitteln. (Natürlich müssen wir für exakte Berechnungen auch den erwärmten Wasserstoff beachten.)

Laut Physik (und Tafelwerk) brauchen wir dazu noch die spezifische Wärme-Kapazität der Salzsäure  $c_w[\text{HCl}]$  und die Temperatur-Differenz  $\Delta T$  (bzw.  $\Delta \vartheta$  bei Celcius-Temperatur-Werten).

$$Q = -c_w[\text{HCl}] \cdot m[\text{HCl}] \cdot \Delta T$$

$c_w$  ... spezifische Wärmekapazität

Läuft eine Reaktion bei einem konstanten Volumen (isochor) ab, dann ist die **Reaktions-Wärme  $Q_V$**  (oder auch  $Q_{r,V}$  bzw.  $Q_{V=\text{const}}$ ) gleich der Reaktions-Energie  $\Delta U$  (bzw.  $\Delta_R E$ ):

$$Q_V = \Delta U = \Delta_R E$$

#### Definition(en): Reaktions-Energie

Die Reaktions-Energie ist die bei einer chemischen Reaktion veränderte innere Energie.

Die Reaktions-Energie ist die Differenz zwischen der inneren Energie der Reaktions-Produkte und der der Ausgangs-Stoffe.

Die Reaktions-Energie ist die Wärme-Menge, die eine chemische Reaktion bei isochorer Prozessführung (unter konstanten Volumen) umwandelt (abgibt oder aufnimmt).

Über die Wärme-Abgabe bzw. –Aufnahme definieren wir die einfache energetische Betrachtung von Reaktionen. Eine Reaktion die Wärme-Energie (od. vergleichbare Energie-Formen) freisetzt – also abgibt – heißt **exotherm**. Muss eine Reaktion Energie aufnehmen – ihr also Wärme zugeführt werden, dann nennen wir sie **endotherm**.

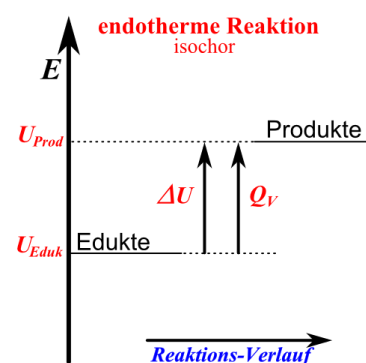
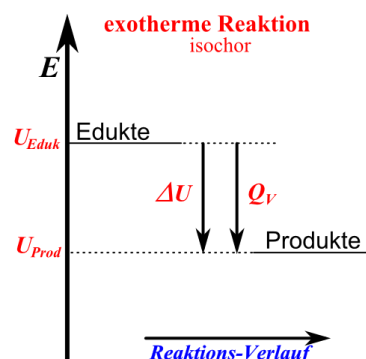
Die gesamte Veränderung der inneren Energie ( $\Delta U$ ) finden wir in der Reaktions-Wärme  $Q$  wieder.

In der Technik (technische Chemie) werden isochore Reaktionen z.B. in Autoklaven durchgeführt. Alle Ausgangsstoffe kommen in einen stabilen Druck-Behälter. Dieser wird dann verschlossen und die Reaktion durchgeführt. Ev. wird zur Aktivierung der Reaktion auch noch der Druck erhöht (z.B. auch durch Temperatur-Erhöhung).

Voraussetzung für eine isochore Prozessführung sind Gase als beteiligte Stoffe. Entstehen diese z.B. bei einer Reaktion in einem Autoklaven, dann steigt die Temperatur durch den steigenden Druck praktisch von ganz allein.

Sind nur flüssige oder feste Stoffe an einer Reaktion beteiligt, dann kommt es sowieso zu keiner wesentlichen Volumen-Änderung. Die Erhöhung oder Erniedrigung des Druck hat nur einen sehr geringen – zu vernachlässigbaren – Effekt auf den Reaktions-Verlauf.

Das für die meisten Autoklaven-Reaktionen mit steigender Temperatur ausgenutzte Prinzip ist die **RGT-Regel (VANT HOFFsche Regel)**.



Nach dieser steigt die Reaktions-Geschwindigkeit um das 2- bis 3-fache, wenn man die Temperatur um 10 K (bzw. 10 grd) erhöht. Der Begriff Autoklav bedeutet so viel wie "selbstverschließend". Die Größe richtet sich nach den zu behandelnden Stoffen. Für die Herstellung von imprägnierten Hölzern, Verbund-Werkstoffen mit Epoxidharzen oder dem Vulkanisieren von Auto-Reifen werden meist sehr große Geräte gebraucht (siehe Abb.).

Im Labor und im Medizin-Bereich nutzt man Autoklaven zur Herstellung kleiner Stoffmengen (Medikamente) oder für die Sterilisation von Utensilien.

Aus der Küche kennen viele vielleicht den Schnell-Kochtopf. Er ist quasi eine Heim-Ausführung eines Autoklaven. Die zu kochenden Lebensmittel (z.B. zähes Kochfleisch) wird hier bei rund 120 °C gekocht.

Das ist dadurch möglich, dass der Schnell-Kochtopf Druck-dicht verschlossen wird. Beginnt das Wasser zu sieden, dann kann der Wasser-Dampf nicht entweichen und baut so einen Überdruck auf.

Dieser bewirkt nun wiederum eine Erhöhung der Siedetemperatur des (Koch-)Wasser's auf. Die Temperatur kann nun weiter gesteigert werden. Letztendlich erreicht man im Schnell-Kochtopf einen Druck von 2 atm. also dem doppelten des üblichen Luftdruck.

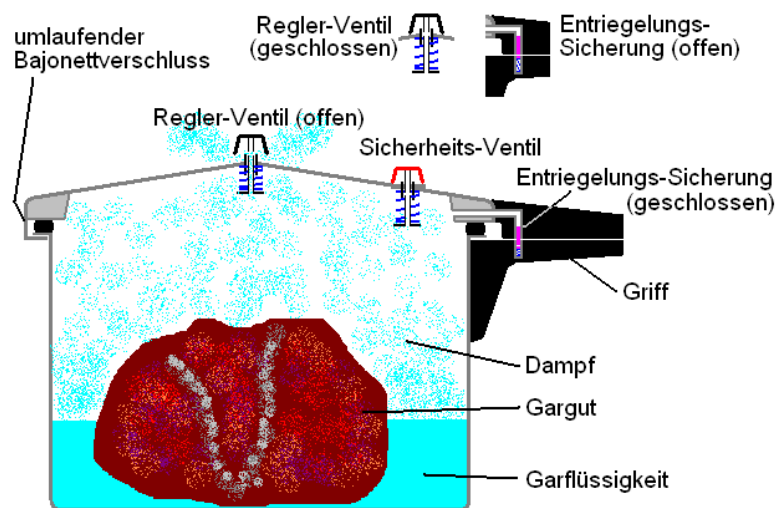
Danach löst das Überdruck-Ventil aus. Eine weitere Temperatur-Erhöhung bringt also nichts. Optimal ist eine so große Wärme-Zufuhr, dass das Überdruck- bzw. Regel-Ventil immer gerade so auslöst (leicht zischt).

Das Kochgut wird unter erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur deutlich schneller gar. Die höhere Temperatur ist die eigentlich wirkende Größe.

Das Kochen im Schnell-Kochtopf ist auch wieder ein schönes Beispiel für die Anwendung / Gültigkeit der RGT-Regel.



Autoklav zur Herstellung von Verbund-Glas (auch Sicherheits-Glas genannt)  
Q: de.wikipedia.org (JaviRD)



Schnitt durch einen Schnell-Kochtopf

---

### Aufgaben:

1. Erkunden Sie, ob in Ihrer (näheren) Familie Schnell-Kochtöpfe vorhanden sind und benutzt werden! Was wird damit vorrangig zubereitet und welchen Zeit-Vorteil erreicht man dadurch?
2. Erklären Sie, warum man medizinische Geräte und Bekleidung in (teilweise mit Wasser befüllten) Autoklaven sterilisiert!
3. Eine Wasser-Menge von 800 ml wird von 20 °C auf 75 °C erwärmt. Wie groß ist die notwendige Wärme-Menge unter der Vernachlässigung einer nebenläufigen Wärme-Abgabe an die Umgebung!
4. Von einem Reaktions-Gemisch mit einer Masse von 26 g wird bei ablaufender Reaktion eine Wärme-Menge von 14 kJ freigesetzt. Wieviel Stoff-Gemisch muss eingesetzt werden, wenn man 183 ml Wasser (Verlust-frei) damit von 23 °C auf 45 °C erwärmen möchte!
5. In einem sehr gut Wärme-isoliertem und Druck-dicht verschlossenen Reaktions-Gefäß werden 267 ml einer verdünnten Schwefelsäure-Lösung und 534 ml einer gleichkonzentrierten Kaliumhydroxid-Lösung zur Reaktion gebracht. Die Temperatur ist dabei von anfangs 22 °C auf 35 °C gestiegen. Berechnen Sie die umgesetzte Wärme-Energie und die Reaktions-Energie!
6. Die Einheit Calorie wurde zuerst darüber definiert, dass dies die notwendige Wärme-Menge ist, mit der 1 g Wasser um 1 grad (exakt von 14,5 auf 15,5 °C) erwärmt werden kann. Berechnen Sie die notwendige Energie in J, kJ und kcal für das Erwärmen von 1 kg Wasser um 1 K!

### für die gehobene Anspruchsebene:

- x. Warum verwendet man überhaupt Wasser im Sterilisations-Autoklaven? Könnte man den gleichen Effekt nicht auch mit einer trocknen Hitze (gleicher Temperatur) erreichen?

---

## **kleines Praktikum mit Kälte-Pack's / Kälte-Kompresse / Kühl-Pack**

weitere alternative Namen: Sofortkältepack / Sofortkältekompresse / ...

### **Aufgaben:**

- 1. Erstellen Sie für dieses Praktikum ein Verlaufs-Protokoll! Die Lösungen der Aufgaben werden ebenfalls innerhalb des Protokoll's notiert!***
- 2. Untersuchen Sie ein (noch nicht aktiviertes) Kälte-Pack von außen und dann auch durch vorsichtiges Öffnen an der Schmalseite! Notieren Sie Ihre Beobachtungen!***
- 3. Recherchieren Sie den Aufbau und die Funktionsweise von Kälte-Pack's für die Anwendung bei Sport-Verletzungen!***
- 4. Planen Sie Experimente, mit deren Hilfe Sie die möglichen Inhaltsstoffe nachweisen oder zumindestens unterscheiden können!***
- 5. Ermitteln Sie die Reaktions-Wärme eines Kälte-Pack's mit Hilfe der folgenden Versuch-Beschreibung!***
- 6. Stellen Sie den Temperatur-Verlauf graphisch dar!***
- 7. Berechnen Sie die Reaktions-Wärme eines Kälte-Pack's!***

### **Bestimmung der Reaktionswärme eines Sofortkältepack's**

#### ***Materialien / Geräte:***

Kochtopf (24 cm Durchmesser); Kälte-Pack; Wasser (möglichst Zimmer-Temperatur); Waage; Thermometer; Rührstab

#### ***Durchführung / Ablauf:***

- Bestimmen Sie die Masse des leeren Kochtopf's
- Füllen Sie den Topf mit Wasser, so dass der Kälte-Pack vollständig / bedeckt im Wasser liegen kann
- Bestimmen Sie die Gesamtmasse des Topfes mit dem Wasser und die Wasser-Temperatur
- Notieren Sie nun alle 30 s die Wasser-Temperatur (vorher immer vorsichtig umrühren), mindestens 2 min länger, nachdem die Temperatur nicht mehr sinkt oder wieder steigt
- Aktivieren Sie direkt nach einer Messung den Kälte-Pack und legen Sie ihn sofort in den Topf

---

## **kleines Praktikum mit Wärme-Kissen / Taschenwärmer**

### **Aufgaben:**

- 1. Erstellen Sie für dieses Praktikum ein Verlaufs-Protokoll! Die Lösungen der Aufgaben werden ebenfalls innerhalb des Protokoll's notiert!***
- 2. Untersuchen Sie einen (noch nicht aktivierten) Taschenwärmer von außen und dann auch durch vorsichtiges Öffnen an der Schmalseite! Notieren Sie Ihre Beobachtungen!***
- 3. Recherchieren Sie den Aufbau und die Funktionsweise eines Taschenwärmer's!***
- 4. Planen Sie Experimente, mit deren Hilfe Sie die möglichen Inhaltsstoffe nachweisen oder zu mindestens unterscheiden können!***
- 5. Ermitteln Sie die Reaktions-Wärme eines Taschenwärmer's mit Hilfe der folgenden Versuch-Beschreibung!***
- 6. Stellen Sie den Temperatur-Verlauf graphisch dar!***
- 7. Berechnen Sie die Reaktions-Wärme eines Taschenwärmer's!***

### **Bestimmung der Reaktionswärme eines Taschenwärmer's**

#### **Materialien / Geräte:**

Becherglas (300 ml); Taschenwärmer; Wasser (möglichst Zimmer-Temperatur); Waage; Thermometer; Rührstab

#### **Durchführung / Ablauf:**

- Bestimmen Sie die Masse des leeren Becherglases
- Füllen Sie das Becherglas mit Wasser, so dass der Taschenwärmer vollständig / bedeckt im Wasser liegen kann
- Bestimmen Sie die Gesamtmasse des Becherglases mit dem Wasser und die Wasser-Temperatur
- Notieren Sie alle 30 s die Wasser-Temperatur (vorher immer vorsichtig umrühren), mindestens 2 min länger, nachdem die Temperatur nicht mehr steigt
- Aktivieren Sie den Taschenwärmer direkt nach einer Messung und legen Sie ihn sofort in das Becherglas

## Reaktionen mit isobarer Prozess-Führung

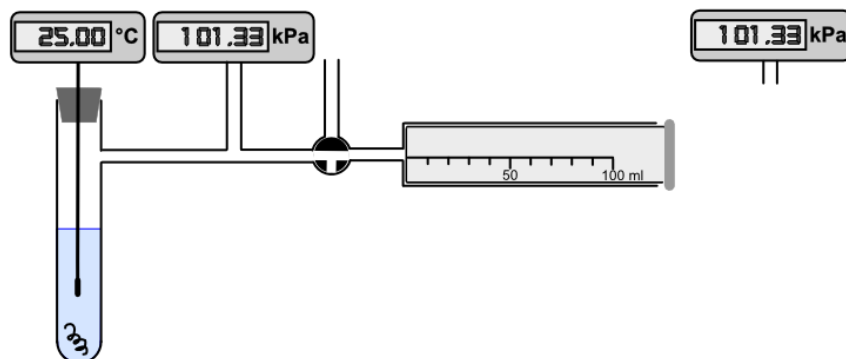


Eine andere Möglichkeit eine chemische Reaktion thermodynamisch zu verfolgen, ist eine isobare Versuchsanordnung. Dabei wird darauf geachtet, dass der Druck immer konstant bzw. unverändert bleibt.

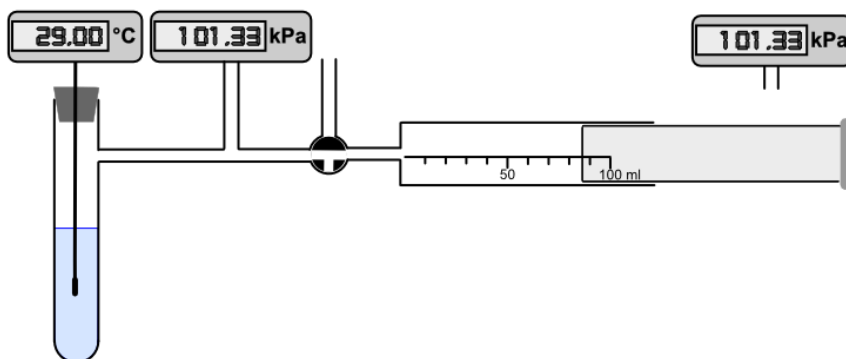
Um den freiwerdenden Wasserstoff aufzufangen, verwenden wir einen Kolbenprober. Mit ihm lässt sich das entstehende Wasserstoff-Volumen gut erfassen. Die Reaktion wird bei Standard-Bedingungen (25 °C und 101,325 kPa) gestartet.

Schon nach kurzer Zeit beobachtet man eine Temperatur-Erhöhung und eine Volumen-Zunahme. Damit ein ev. klemmender Kolbenprober das Ergebnis nicht verfälscht, halten wir den Druck (bei 101,325 kPa) konstant. Dazu kann man die Kolben leicht rausziehen oder reinschieben.

Nachdem die Reaktion abgelaufen ist, können wir eine bestimmte Temperatur und das gebildete Volumen ablesen.



Ausgangs-Situation



End-Situation

Die Temperatur ist hier deutlich geringer, als in der isochoren Versuchs-Führung. Bedeutet das nun, dass hier weniger Energie frei wird? Natürlich nicht! Es wird ganz offensichtlich weniger Wärme-Energie frei. Mit Hilfe der Temperatur-Differenz können wir diese wiederum exakt berechnen. Aber wo steckt nun genau die restliche Energie? Sie wird für die Verschiebung der Kolben's aufgewendet. Was man immer schnell übersieht, aber trotzdem vorhanden ist, ist der Luftdruck. Er drückt von außen auf den Kolben. Gegen diesen Druck arbeitet nun unser System. Bei festgestelltem Kolben würde der interne Druck steigen. Unser Ziel ist aber eine isobare Versuchsführung. Es muss also darauf geachtet werden, dass der innere und äußere Druck gleich groß sind.

Um nun die verrichtete **Arbeit W** beim Verschieben des Kolbenprober's zu berechnen, benutzen wir wieder definierte Größen der Physik. Dabei ist die Arbeit die (wirkende) **Kraft F** und der (in Kraft-Richtung liegende) zurückgelegte **Weg s**.

$$W = F \cdot s$$

Auf den Kolbenprober wirkt von außen der Luftdruck  $p$ . Dieser wirkt auf den Kolben und verschiebt diesen um ein bestimmtes **Volumen V**, welches wir praktischerweise gleich am Kolbenprober ablesen können. Ansonsten müssten wir uns diesen aus der Kolben-Fläche

und dem Verschiebe-Weg berechnen. Und genau hierrüber bestimmen wir jetzt den Weg. Der Innenraum des Kolbenprober ist ja ein Zylinder. Aus der Volumen-Gleichung:

$$V = A_0 \cdot h \quad \text{mit} \quad A_0 = \frac{\pi}{4} d^2$$

Die Höhe h entspricht dabei dem gesuchtem Weg s und berechnet sich:

$$s = h = \frac{V}{A_0}$$

Die von außen wirkende Kraft – die zu überwinden ist – entspricht dem Luftdruck. Dieser wirkt praktisch auf die Kolben-Grundfläche. Somit lässt sich die Kraft F aus dem Druck p ermitteln:

$$p = \frac{F}{A_0} \quad \text{umgestellt nach der Kraft F:} \quad F = p \cdot A_0$$

Setzen wir nun alle diese Teil-Formeln in die gesuchte Gleichung für die Arbeit W, dann ergibt sich:

$$W = p \cdot A_0 \cdot \frac{V}{A_0} \quad \text{wobei sich die Fläche } A_0 \text{ rauskürzen lässt, und:}$$

$$W = p \cdot V$$

übrigbleibt. Dabei müssen wir beachten, dass es hier um das neu gebildete Volumen geht. Häufig wird deshalb auch  $\Delta_R V$  als Symbol benutzt. Gab es schon vorher ein Volumen, dann muss mit der Endsituation die Volumen-Differenz  $\Delta V$  bestimmt werden.

$$W = p \cdot (V_2 - V_1) = p \cdot \Delta V$$

Zu beachten ist hier die definierte Vorzeichensetzung für die Arbeit. Wird Energie abgegeben bzw. Arbeit nach außen geleistet, dann bekommt die Arbeit ein negatives Vorzeichen. Kommt es dagegen zur Aufnahme vom Arbeit (es wird also Arbeit von außen auf das System ausgeführt), dann bekommt die Arbeit ein positives Vorzeichen.

| Volumen        | Druck      | Arbeit               |                 | Vorzeichen |  |
|----------------|------------|----------------------|-----------------|------------|--|
| $\Delta V > 0$ | p = const. | Abgabe durch System  | <b>W &lt; 0</b> | -          |  |
| $\Delta V < 0$ | p = const. | Aufgabe durch System | <b>W &gt; 0</b> | +          |  |

Die als **Volumen-Arbeit W** (besser:  $W_{vol}$ ) bezeichnete Energie ist ein zweiter Bestandteil der beobachteten Reaktions-Energie:

$$\Delta U = Q - W_{vol}$$

Die Änderung des Vorzeichens in der Formel ist zur eindeutigen / definitionsgemäßen Kennzeichnung der Energie-Verrichtung an die Umgebung unbedingt notwendig! In der Natur, im Labor und auch in technischen Einrichtungen finden die Reaktionen typischerweise in offenen Systemen statt. Es wird also bei konstantem Druck ( $\rightarrow$  isobar) gearbeitet. Für diese Prozess-Führung gilt also, dass die Änderung der inneren Energie bzw. die Reaktion-Energie der Summe aus der (bei konstantem Druck) umgewandelten Energie und der Volumen-Arbeit ist:

$$\Delta U = Q_p + W_{Vol} = \Delta_R E$$

Die Kennzeichnung als  $Q_p$  ist hier vor allem für die saubere Unterscheidung der Wärmemengen vorgenommen worden. In den meisten Formel-Sammlungen wird das nicht speziell gemacht.

Um dem besonderen Aspekt der isobar ermittelten Wärme-Menge Rechnung zu tragen – schließlich sollen Werte ja vergleichbar und handhabbar bleiben – hat man die thermodynamische Größe der **Enthalpie H** definiert. Sie ist die Summe aus der Änderung der inneren Energie und der Volumen-Arbeit.

$$Q_p = \Delta U + W_{Vol}$$

wobei eben auch gilt:

$$Q_p = \Delta U + p \cdot \Delta V = \Delta U + p (V_2 - V_1) = (U_2 + p \cdot V_2) - (U_1 + p \cdot V_1)$$

Betrachtet man nun die Enthalpie H als das Wärme-Äquivalent eines Zustands, dann kann man auch:

$$H = U + p \cdot V$$

schreiben. Daraus ergibt sich dann die Änderung der Enthalpie z.B. bei einer Reaktion mit:

$$\Delta H = H_2 - H_1 = Q_p$$

Enthalpie setzt sich aus dem griechischem *en* für darin und *thalpos* für Wärme zusammen. Das Formelzeichen H könnte von heat (engl. für Wärme, Hitze) kommen.

#### Definition(en): exotherme Reaktion

Kommt es im Laufe einer chemischen Reaktion insgesamt zu einer Energie-Abgabe, die sich als Wärme-Energie beschreiben lässt, dann spricht von einer exothermen Reaktion.

Eine exotherme Reaktion ist durch die Abnahme der Enthalpie gekennzeichnet.

#### Definition(en): endotherme Reaktion

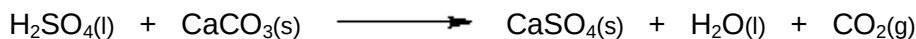
Kommt es im Laufe einer chemischen Reaktion insgesamt zu einer Energie-Aufnahme, die sich als Wärme-Energie beschreiben lässt, dann spricht von einer endothermen Reaktion.

Eine endotherme Reaktion ist durch die Zunahme der Enthalpie gekennzeichnet.



Betrachten wir einige Beispiele für unterschiedliche Verhältnisse von  $\Delta U$ ,  $W$  und  $Q_p$ . Zuerst die **exothermen Reaktionen**:

### Beispiel: Reaktion von Calciumcarbonat mit einer starken Säure



Die Symbole – Kästchen mit Abkürzung des Aggregatzustandes (s ... fest (solid); l ... flüssig (liquid); g ... gasförmig (gaseous)) unter den Stoffen in der chemischen Gleichung – sollen Modell-haft die Veränderungen der Volumen darstellen.

Die Aggregatzustände oder ein gelöster Zustand (aq ... aquatisiert) werden in chemischen Gleichungen hinter die Stoff-Formeln geklammert als Index geschrieben. Auch eine nicht-indizierte Schreibung ist üblich.

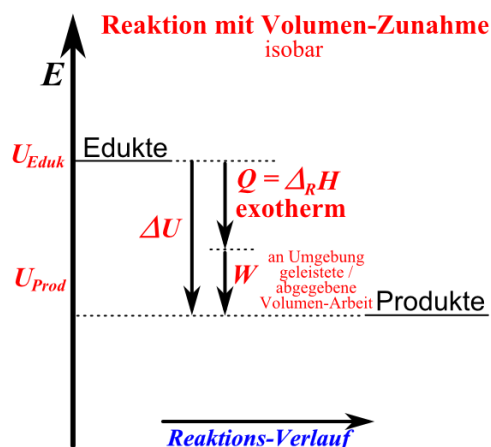
Es entsteht ein Gas ( $\text{CO}_2$ ), was bedeutet, dass Volumen-Arbeit verrichtet wird. Diese Energie-Menge macht einen Teil der Änderung der inneren Energie aus, die hier negativ ausfällt:

$$\Delta U < 0$$

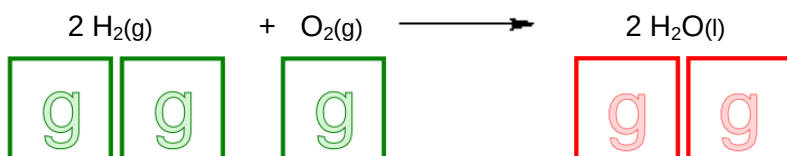
Der restliche Betrag an abgegebener Energie ist die Wärme-Energie. Da wir diese als Änderung der Enthalpie betrachten, sehen wir letztendlich auch die exotherme Reaktion.

Da ein Teil der Reaktions-Energie (Änderung der inneren Energie) als Volumen-Arbeit weg geht, sehen wir eine schwächer exotherme Reaktion, als die Änderung der inneren Energie aussagt.

Dieses und die nächsten Diagramme sind so gestaltet, dass eine gleichgroße (absolute) Differenz der inneren Energie als Vergleichs-Maß benutzt wurde. Dadurch werden die unterschiedlich großen Anteile und Richtungen von Wärme und Arbeit besser sichtbar.



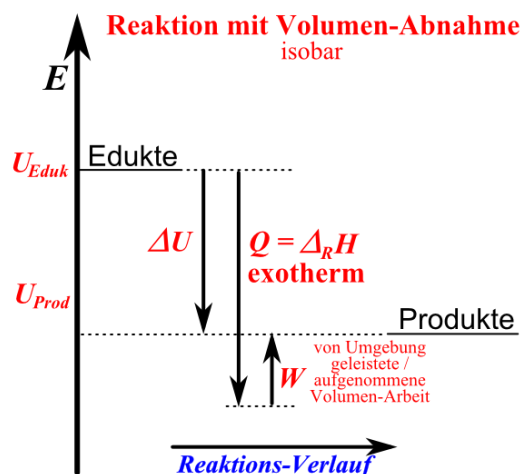
### Beispiel: Synthese von Wasser:



Bei dieser Reaktion nimmt das Volumen in jedem Fall ab, auch wenn vielleicht das Reaktions-Produkt Wasser zuerst noch gasförmig ist. Die Umgebung leistet also Volumen-Arbeit auf unser System (Umgebungs-Druck drückt System zusammen). Die abgegebene Wärme-Menge ist größer, als es die Änderung der inneren Energie (Reaktions-Energie) aussagt. Diese bleibt negativ:

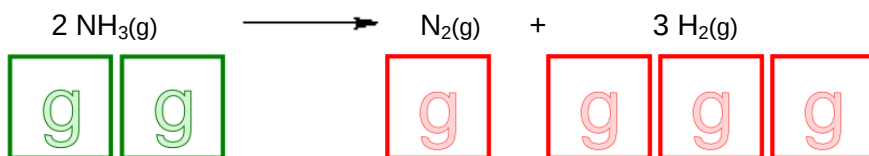
$$\Delta U < 0$$

Die freigesetzte Wärme (exotherme Reaktion) nun die aufgenommene Arbeit (Volumen-Abnahme) heben sich im Verlauf gegenseitig teilweise auf.



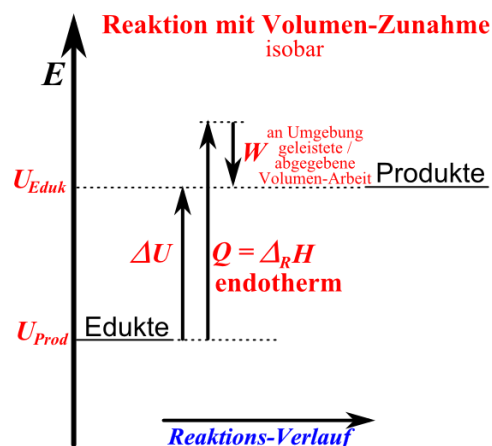
Betrachten wir nun die **endothermen Reaktionen**. Auch hier wurde als Vergleichs-Maß eine gleichgroße Änderung der inneren Energie (Reaktions-Energie) verwendet.

### Beispiel: Ammoniak-Zerlegung:



Da Volumen nimmt hier deutlich zu - praktisch entsteht doppelt so viel Volumen. Dafür ist eine große Wärme-Menge notwendig (Zersetzungs-Wärme). Ein Teil der Energie leistet das System als Volumen-Arbeit an die Umgebung zurück. Insgesamt ist die Reaktion-energie (Änderung der inneren Energie) also positiv bzw. größer als Null.

$$\Delta U > 0$$

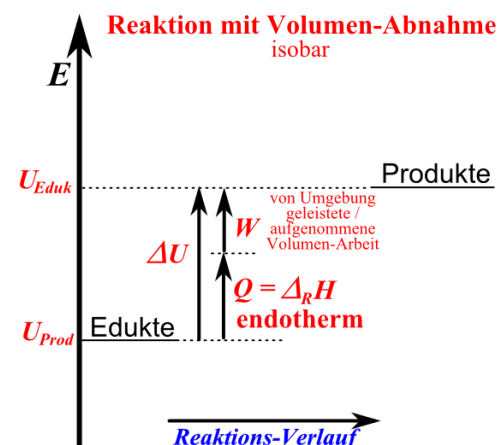


### Beispiel: Modell:



endotherm mit Volumen-Verkleinerung  
Arbeit und Wärme müssen aufgenommen werden, damit die Änderung der inneren Energie vollzogen werden kann

$$\Delta U > 0$$



### Definition(en): Enthalpie

Die Enthalpie ist die umgewandelte (aufgenommene oder abgegebene) Wärme-Menge bei einer chemischen Reaktion unter konstanten Druck-Verhältnissen (isobare Führung).

Die Enthalpie ist die Differenz der Wärme-Energie-Inhalte (H) zweier Zustände eines Vorgangs.

$$\Delta H = H [\text{Reaktionsprodukte}] - H [\text{Ausgangsstoffe}]$$

Die Enthalpie ist die Differenz der inneren Energie der End-Situation eines System (bei isobarer Prozess-Ablauf) und der Ausgangs-Situation.

Die Enthalpie ist die Differenz der Energie-Terme von zwei verschiedenen System-Zuständen. Die Energie-Terme sind jeweils das Produkt aus der inneren Energie U und der Volumen-Arbeit W des System-Zustandes.

$$W = -p \cdot \Delta V$$

$$\Delta U = Q_p - p \cdot \Delta V = Q - W$$

$$Q_p = \Delta U + p \cdot \Delta V = \Delta U + W$$

$$Q_p = (U_2 - U_1) + p \cdot (V_2 - V_1)$$

$$Q_p = (U_2 + p \cdot V_2) - (U_1 + p \cdot V_1)$$

$$H = U + p \cdot V$$

$$Q_p = H_2 - H_1 = \Delta H$$

bei  $p = \text{const.}$  gilt dann:

$$\Delta H = \Delta U + p \cdot \Delta V = \Delta U - W$$

Die Änderung der Enthalpie drückt also die Summe der Veränderung der inneren Energie U und der an die Umgebung geleisteten Volumen-Arbeit W aus.

### Enthalpie und Aggregat-Zustände

| Stoff               | FP<br>[° C] | $\Delta_s H_m$<br>[kJ/mol] | KP<br>[° C] | $\Delta_s H_m$<br>[kJ/mol] |
|---------------------|-------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
| Aluminium           | 660         | 11                         | 2467        | 294                        |
| Chlor               | -101        | 6                          | -35         | 20                         |
| Chlorwasserstoff    | -114        | 2                          | -85         | 16                         |
| Magnesium           | 649         | 9                          | 1107        | 127                        |
| Magnesiumchlorid    | 712         | 43                         | 1418        | 198                        |
| Natrium             | 98          | 3                          | 883         | 97                         |
| Natriumchlorid      | 800         | 28                         | 1460        | 207                        |
| Phosphor (weiß)     | 44          | 1                          | 280         | 64                         |
| Schwefel (romb.)    | 113         | 2                          | 444         | 53                         |
| Schwefelwasserstoff | -114        | 2                          | -60         | 19                         |
| Silicium            | 1410        | 50                         | 2355        | 385                        |
| Wasser              | 0           | 6                          | 100         | 41                         |
| Wasserstoff         | -259        | 0,1                        | -253        | 1                          |

**Die Schmelz- und Verdampfungs-Enthalpien sind ein Maß für den Zusammenhalt der Teilchen.**

### Aufgaben:

1. Erstellen Sie in einer Tabellenkalkulation ein Diagramm zur Darstellung einer möglichen Beziehung zwischen der Schmelz- bzw. Siede-Temperatur und der Schmelz- bzw. Verdampfungs-Enthalpie! Untersuchen Sie die Elemente auch unabhängig von den Verbindungen!
2. Ein See hat eine Oberfläche von  $3 \text{ km}^2$ . In einem Winter hat sich eine  $10 \text{ cm}$  dicke Eis-Schicht gebildet, dessen Dichte mit  $0,915 \text{ g/cm}^3$  ermittelt wurde. Berechnen Sie die benötigte / freigesetzte Wärme-Menge!
3. Welche Energie (Sonnen-Strahlung) muss aufgebracht werden, um  $1 \text{ mm}$  der obersten Wasser-Schicht des See's zu verdampfen?
4. Vergleichen Sie die molaren Schmelz- und Verdampfungs-Enthalpien der folgenden Stoffe Aluminium, Schwefelwasserstoff, Silicium und Wasser miteinander! Erklären Sie die Unterschiede!

### Bestimmung der Schmelz-Enthalpie von Wasser

#### Materialien / Geräte:

Kalorimeter (mit bekannter Wärme-Kapazität); Wasser; Eis-Würfel; Thermometer; Rührstab

#### Hinweis:

- die jeweils zugesetzten Massen kann man gut messen, wenn man das Kalorimeter auf einer Waage stellt und dann über die Tara-Funktion die Masse-Veränderung erfasst

#### Durchführung / Ablauf:

- Befüllen Sie das Kalorimeter 1/2 mit Wasser (Masse bestimmen  $m_W$ )
- Messen Sie die Temperatur nach  $1 \text{ min}$  ( $\vartheta_0$ )
- Geben Sie einige Eis-Würfel dazu (Masse  $m_E$  und  $\vartheta_E$  bestimmen)
- Nehmen Sie den zeitlichen Verlauf der Schmelze bis zur stabilen Misch-Temperatur  $\vartheta_M$  auf
- Notieren Sie alle  $30 \text{ s}$  die Wasser-Temperatur (vorher immer vorsichtig umrühren), mindestens  $2 \text{ min}$  länger, nachdem die Temperatur sich nicht mehr verändert
- Berechnen Sie über:

$$(C_K + c_W \cdot m_W) \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_M) = \Delta_S H + c_W \cdot m_E \cdot \vartheta_M \quad \text{und} \quad \Delta_S H_m = \frac{m_W}{m_E} \cdot \Delta_S H$$

die Schmelz-Enthalpie des Eises

## ZURÜCK ZU: Reaktions-Enthalpie in isochoren Systemen



Gilt denn hier auch die Formel für die Berechnung für die Veränderung der inneren Energie bei isochorer Prozess-Führung?

$$\Delta U = Q + W_{\text{Vol}}$$

Die Wärme  $Q$  können wir direkt in einem Kalorimeter od.ä. messen. Die Volumenarbeit  $W_{\text{Vol}}$  können wir berechnen mit:

$$W = p \cdot \Delta V$$

Das Volumen verändert sich ja per Definition bei einem isochoren System nicht. D.h. die Volumen-Änderung  $\Delta V$  ist gleich Null:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 0 \quad \text{da:} \quad V_2 = V_1$$

In die Berechnung der Volumen-Arbeit geht somit die Volumen-Änderung mit dem Faktor Null ein, was den ganzen Ausdruck auf den Wert Null bringt:

$$W = p \cdot 0$$

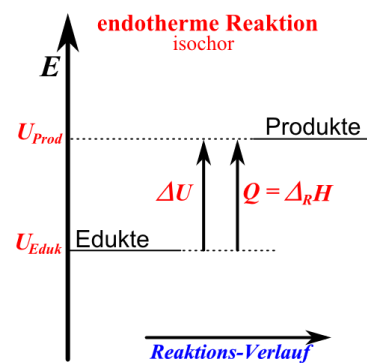
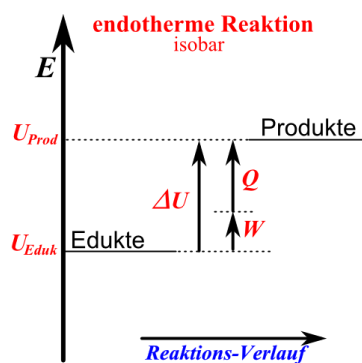
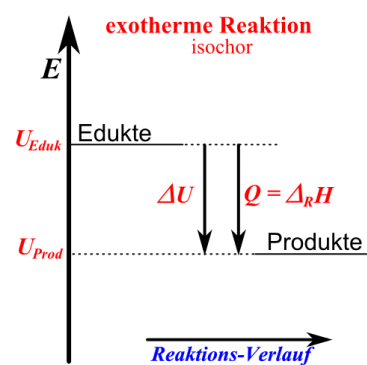
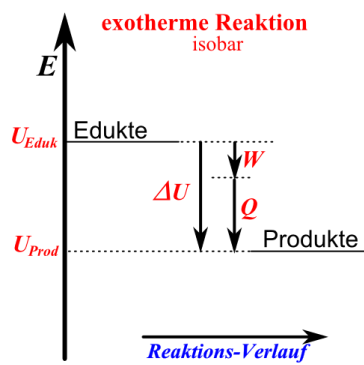
Mit anderen Worten, **es wird keine Volumen-Arbeit verrichtet.**

$$\Delta U = Q + 0$$

Die gesamte Energie-Umwandlung vollzieht sich über die Wärme-Auf- bzw. Abgabe. Etwas genauer und ausführlicher über Volumenarbeit sprechen wir im Abschnitt (→ [Berechnung von Reaktionsenthalpien aus Reaktionsdaten](#))

### Aufgaben:

1. Überlegen Sie sich, ob 18 g flüssiges Wasser eine größere / gleich große / kleinere innere Energie beinhaltet, als 18 g gasförmiges Wasser! Begründen Sie Ihre Position!
2. Berechnen Sie die Volumen-Arbeit, die bei einer (isobaren) Reaktion verrichtet wird, wenn (unter Standard-Bedingungen) 1 mol Gas gebildet wird!
3. Erstellen Sie für die folgenden chemischen Reaktionen die Energieniveau-Schemata für eine isobare und die isochore Prozess-Führung!
  - a) endotherme Zersetzung von Wasser in die Elemente
  - b) vollständige Oxidation von Kohlenstoff
4. Für die Knallgas-Reaktion ist die Reaktions-Enthalpie mit -484 kJ/mol ermittelt worden. Geben Sie die innere Energie der Reaktions-Produkte an! Begründen Sie!
5. In einem Hand-Feuerlöscher beginnt mit dem Aktivieren der Ablauf einer chemischen Reaktion, die genügend Gas zum Austreiben des Löschmittels erzeugt. Um welche Art der Prozess-Führung handelt es sich hier? Unterscheiden Sie die Phasen vor und nach dem Öffnen der Schlauch-Spritze!



## Standardisierung der Enthalpie



Für beliebige Reaktions-Ansätze bekommen wir im Experiment auch irgendwelche Ergebnisse für die Energie-Werte. Die Energie-Umsätze sind extensive Zustands-Größen, die sich mit der Größe der Stoff-Probe ändern. Für Vergleiche braucht man aber standardisierte Werte.

In der Chemie bietet sich hier die Stoffmenge  $n$  an. Damit kann man die Energie-Werte auf eine Basis bringen und eine sogenannte molare Größe definieren (s.a.  $\rightarrow$ ).

$$\Delta_R H_m = \frac{\Delta_R H}{n}$$

Die molare Reaktions-Enthalpie  $\Delta_R H_m$  ist also der Quotient aus der ermittelten Reaktions-Enthalpie und der Stoffmenge der verwendeten Stoff-Probe.

Damit erhalten wir eine intensive Zustands-Größe.

Genauso können wir auch mit der Änderung der inneren Energie verfahren.

$$\Delta_R U_m = \frac{\Delta_R U}{n}$$

Da wir schon gesehen haben, dass Volumen und Druck – besonders bei Gasen – von der Temperatur und vom Umgebungs-Druck abhängen werden diese ebenfalls festgelegt.

I.A. verwendet man Standard-Bedingungen, d.h.:

Die unter Standard-Bedingungen geltenden Werte werden meist mit einer 0 oder einem durchgestrichenen Kreis  $\circ$  im Exponenten des Formel-Zeichens gekennzeichnet.

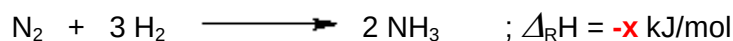
| Standard-Bedingungen (STP-Bedingungen) |                                      |
|----------------------------------------|--------------------------------------|
| Temperatur                             | 298 K = 25 °C                        |
| (Umgebungs- / Luft-)Druck              | 101,325 kPa = 1 bar<br>= 1013,25 hPa |

Die molare Standard-Reaktions-Enthalpie erhält damit das Symbol:  $\Delta_R H_m^0$ .

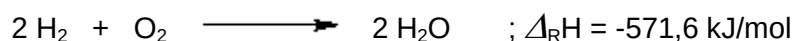
Die Angabe erfolgt Semikolon-getrennt hinter der Reaktions-Gleichung. Eigentlich ist es ein Pflicht-Teil, da die Energie ja im Verlauf der Reaktion umgewandelt wurde und dies zwangsläufig zu einer chemischen Reaktion dazu gehört.



Der Einfachheit halber wird oft nicht der Zahlenwert, sondern die Richtung exo- oder endotherm durch ein negatives bzw. positives Vorzeichen vor einer Variable mit Einheit angegeben.



Die molaren Werte beziehen sich vereinbarungsgemäß auf die sogenannten Kardinal-Gleichungen. Das sind die chemischen Gleichungen, die mit den kleinsten ganzzahligen Stoffmengen auskommen. Gleichungen mit gebrochenen Stoffmengen müssen die entsprechend geteilten Energie-Mengen angeben.





Eine weitere standardisierte Größe ist das molare Reaktions-Volumen  $\Delta_R V_m$ . Beim (Reaktions-)Volumen handelt es sich um eine extensive Größe, die mit der Stoffmenge normalisiert wurde:

$$\Delta_R V_m = \frac{\Delta_R V}{n} = \frac{V_2 - V_1}{n}$$

### Aufgaben:

1. Bei der Reaktion von 16 g Zink mit 8 g Schwefel wurde eine Reaktions-Enthalpie von  $-50,5 \text{ kJ}$  ermittelt. Wie groß ist die molare Reaktions-Enthalpie für diese Reaktion?
2. Bei der (isobaren) Reaktion von 17,6 g Schwefel mit Sauerstoff wurde eine Wärme von 163 kJ abgegeben. Berechnen Sie die molare Reaktions-Enthalpie!
3. Um die Qualität einer Versuch-Anordnung zu prüfen, wurden in dieser 4 g Kupfer-Pulver mit 1 g Schwefel-Pulver umgesetzt. Die erwartete molare Reaktions-Enthalpie (lt. Tabellenwerk) soll  $-166,5 \text{ kJ}$  betragen. Wie groß ist der prozentuale Fehler der Versuchs-Anordnung, wenn eine Freisetzung von 4,9 kJ ermittelt wurden?

Bei Abweichungen von den Standard-Bedingungen müssen deren Veränderungen beachtet werden. Bei festen und flüssigen Stoffen sind die Abhängigkeiten des Volumen's von Druck und Temperatur zu vernachlässigen. Bei Gasen ergibt sich aber eine starke Abhängigkeit. Sind hierbei Korrekturen notwendig, weil die Standard-Bedingungen nicht eingehalten werden konnten, dann nutzt man hierfür die **Zustands-Gleichung idealer Gase**:

$$p \cdot V = R \cdot T \cdot n \quad \text{bzw. für molare Bezüge: } p \cdot V_M = R \cdot T$$

Die **allgemeine Gas-Konstante R** wird mit  $8,3145 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$  eingesetzt.

### Aufgaben:

1. Ein Mol eines Gases hat bei Standard-Bedingungen das Volumen von 22,4 Liter. Berechnen Sie das Volumen des Gases bei  $50^\circ \text{C}$ !
2. Um wieviel Prozent ändert sich das Volumen von Stickstoff, wenn es von Standard-Bedingungen auf Normal-Bedingungen gebracht wird?

Reale Gase weichen doch in einigen Parametern von idealen Gasen ab. Das spielt vor allem bei Berechnungen mit einem hohen Genauigkeits-Anspruch eine Rolle.

Eine angepasste Gleichung stammt von VAN-DER-WAALS:

Für die realen Gase hat auch BERTHELOT eine angepasste Zustands-Gleichung entwickelt:

Diese Gleichung ist deutlich genauer und sie hat auch einen Temperatur-abhängigen Teil für anziehende Kräfte in der Formel.

$$\left(p + \frac{a \cdot n^2}{V_M^2}\right) \cdot (V_M - b) = R \cdot T$$

$$\left(p + \frac{a \cdot n^2}{T \cdot V^2}\right) \cdot (V - n \cdot b) = n \cdot R \cdot T$$

a ... Kohäsions-Druck

b ... Ko-Volumen

## spezielle Enthalpien



Bei der Unzahl von chemischen Reaktionen ist es ein schier unmögliches Unterfangen, alle Enthalpien tabellarisch zu erfassen. Wie wir später ( $\rightarrow$ ) noch sehen werden, ist das auch gar nicht notwendig. Mit einer speziellen Gleichung lässt sich praktische jede Reaktions-Enthalpie berechnen.

Trotzdem braucht man natürlich Orientierungs-Größen, um z.B. auch die eigene Messtechnik im Labor abzugleichen.

Die Aggregatzustands-Übergänge als eher physikalische Vorgänge können für praktisch alle Stoffe gut verfolgt werden und meist auch unter standardisierten Bedingungen gemessen werden. Dazu haben wir schon etwas gesagt ( $\rightarrow$  [Enthalpie und Aggregat-Zustände](#)). Als Tabellen-Werte erhalten wir die molaren Schmelz- und Verdampfungs-Enthalpien.

Für einige Reaktions-Arten sind ebenfalls tabellarische Zusammenstellungen gemacht worden. Dazu gehören die vollständige Oxidationen mit den dazu gehörenden Verbrennungs-Enthalpien. Um die **molare Standard-Verbrennungs-Enthalpie**  $\Delta_v H_m^0$  zu ermitteln, muss man die chemischen Reaktionen so führen, dass beim Aufstellen der dazugehörigen Gleichungen dann:

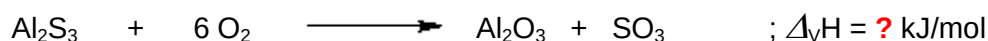
- (auf der linken Seite) der zu verbrennenden Stoff mit der Stöchiometrie-Zahl 1 (also Stoffmenge 1 mol) und
- soviel Sauerstoff enthalten, dass von jedem in der Substanz enthaltenen Element das Oxid mit der höchsten Oxidations-Zahl entstehen kann

und

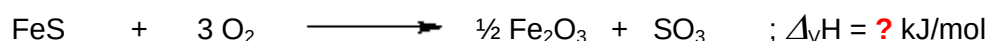
- (auf der rechten Seite) nur die genannten Oxide stehen.

Praktisch arbeitet man dabei mit einem Überschuss an Sauerstoff, damit wirklich alle Elemente bis auf die höchste Oxidations-Stufe (Oxidations-Zahl  $\rightarrow$ ) gebracht werden können. Die Notwendigkeit der Einhaltung von Standard-Bedingungen (298 K; 101,3 kPa) ergibt sich schon aus der Benennung der Größe.

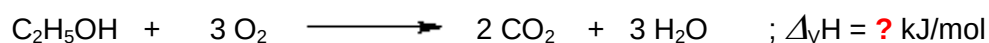
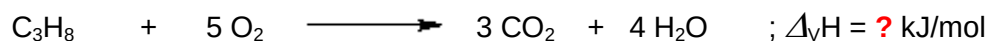
Gültige Gleichungen wären somit:



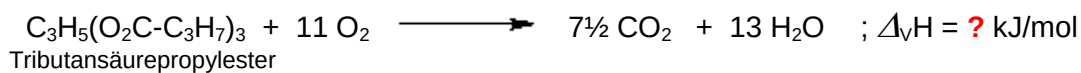
aber auch diese mit gebrochenen Stoffmengen:



Da auch die meisten organischen Stoffe brennbar sind, ist die Verbrennungs-Enthalpie hier sehr gebräuchlich:



oder auch:



| Stoff<br>(Energie-Träger) | molare<br>Verbrennungs-<br>Enthalpie<br>[kJ/mol] | spezifische<br>Verbrennungs-<br>Enthalpie<br>[MJ/kg] | Volumen-bez.<br>Verbrennungs-<br>Enthalpie<br>[MJ/m <sup>3</sup> ] |
|---------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Benzin                    |                                                  | -44                                                  |                                                                    |
| Benzol                    |                                                  | -40                                                  |                                                                    |
| Braunkohlen-Briketts      |                                                  | -20                                                  |                                                                    |
| Brenn-Torf                |                                                  | -13                                                  |                                                                    |
| Butan                     |                                                  |                                                      | -124                                                               |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Erdgas                    |                                                  |                                                      | -32                                                                |
| Erdöl                     |                                                  | -42                                                  |                                                                    |
| Ethanol                   |                                                  | -30                                                  |                                                                    |
| Ethin                     |                                                  |                                                      | -57                                                                |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Fette                     |                                                  | -39                                                  |                                                                    |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Generator-Gas             |                                                  |                                                      | -5                                                                 |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Heiz-Öl                   |                                                  | -41                                                  |                                                                    |
| Holzkohle                 |                                                  | -26                                                  |                                                                    |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Kohlenstoffmonoxid        |                                                  |                                                      | -13                                                                |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Methan                    |                                                  |                                                      | -36                                                                |
| Methanol                  |                                                  | -26                                                  |                                                                    |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Propan                    |                                                  |                                                      | -93                                                                |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Stadt-Gas                 |                                                  |                                                      | -16                                                                |
| Steinkohle                |                                                  | -29                                                  |                                                                    |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Traubenzucker             |                                                  |                                                      |                                                                    |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |
| Wasser-Gas                |                                                  |                                                      | -12                                                                |
| Wasserstoff               |                                                  |                                                      | -11                                                                |
|                           |                                                  |                                                      |                                                                    |

---

Eine weitere charakteristische Reaktion ist Bildung eines Stoffes aus den Elementen. In praktisch allen Fällen kann man die Bildung eines Stoffes darauf zurückführen, auch wenn es dabei ev. einiger Zusatz- oder Umwege gibt. Zu mindestens für einfache Stoffe ist eine Bildung aus den Elementen irgendwie möglich. In dem Fall können wir direkt die Bildungs-Enthalpie ermitteln.

Für die **molare Standard-Bildungs-Enthalpie**  $\Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^0$  werden nun chemische Reaktionen mit ihren Gleichungen gesucht, bei denen:

- (auf der rechten Seite) der gebildete Stoff nur mit der Stoffmenge 1 mol (Stöchiometrie-Zahl 1) steht
- und
- (auf der linken Seite) die notwendigen Elemente in einer – unter den gegebenen Bedingungen – stabilen Form stehen

Die Einhaltung der Standard-Bedingungen ist natürlich ebenfalls notwendig. Ist dies nicht möglich, sind Korrektur-Rechnungen durchzuführen.

Z.B. würden die Vorgaben zur Gleichungs-Aufstellung für die Bildung von Ammoniak bedeuten, dass eine weniger gebräuchliche Gleichung genutzt wird:



aber für viele andere Bildungen, die ganz "normalen" Gleichungen taugen:



Bei organischen Stoffen ist dieser Weg allerdings kaum möglich. Hier müssen andere Wege ( $\rightarrow$ ) ausgenutzt werden, um die gewünschten Werte zu ermitteln.

### Definition(en): Bildungs-Enthalpie

Die Bildungs-Enthalpie ist die Enthalpie, die bei der Bildung einer Verbindung aus den Elementen gebraucht oder freigesetzt wird.

(Elemente haben eine Bildungs-Enthalpie von 0 kJ/mol.)

Die Werte sind für Standard-Bedingungen tabelliert!

### Aufgaben:

**1. Stellen Sie die Verbrennungs-Gleichungen für die folgenden Stoffe! (vollständige Oxidation!)**

- |                         |                  |                             |
|-------------------------|------------------|-----------------------------|
| a) $\text{H}_2$         | b) $\text{PbO}$  | c) Ammoniak                 |
| d) $\text{H}_2\text{S}$ | e) $\text{PH}_3$ | f) Trihexansäurepropylester |

**2. Stellen Sie die chemischen Gleichungen auf, die für die Bildung der nachfolgenden Stoffe genutzt werden müssten! Geben Sie auch immer die einzusetzenden Massen und Volumina (bei Gasen) an, die bei angenommen vollständigem Umsatz notwendig wären!**

- |                   |                            |                             |
|-------------------|----------------------------|-----------------------------|
| a) $\text{BaO}$   | b) $\text{KBr}$            | c) Magnesiumsulfid          |
| d) Calciumfluorid | e) $\text{Al}_2\text{O}_3$ | f) Magnesiumhydroxid (fest) |

3.

### komplexe Aufgaben:

**1. Der Hauptbestandteil von Erdgas wird nicht für Synthesen in der chemischen Industrie sondern auch zur Energie-Erzeugung verwendet.**

- Formulieren Sie die LEWIS-Formel für den Hauptbestandteil! Leiten Sie aus dem Bau mindestens vier Eigenschaften ab!**
- Stellen Sie die chemische Gleichung für die vollständige Verbrennung des Hauptbestandteil's auf und berechnen Sie die molare Reaktions-Enthalpie für diese Reaktion!**
- Erläutern Sie an dieser Reaktion den 1. Hauptsatz der Thermodynamik!**
- In der Praxis (z.B. Gas-Öfen) wird statt mit reinem Sauerstoff mit Luft gearbeitet. Vereinfacht kann man von einer Luft ausgehen, die zu 20 % Sauerstoff und zu 80 % Stickstoff enthält. Eine Heizungs-Anlage kann man sich vereinfacht als Kalorimeter vorstellen. Das zirkulierende Wasser (im Beispiel 326 l) im Heizsystem stellt den Wärme-aufnehmenden Stoff dar. Berechnen Sie das Volumen vom Erdgas-Hauptbestandteil, der benötigt wird, um das Wasser mit einer Vorlauf-Temperatur von 15 °C auf die notwendigen 65 °C für die Heizkörper zu erwärmen!**
- Berechnen Sie, welcher Anteil der bei b) ermittelten Wärme-Menge in der Anlage genutzt werden können, wenn die Ausgangsstoffe mit 285 K zugeführt und den Verbrennungs-Raum mit 650 K verlassen! Die Wärmekapazität der Abgase wird mit 30 J/K\*mol angegeben.**

2.

---

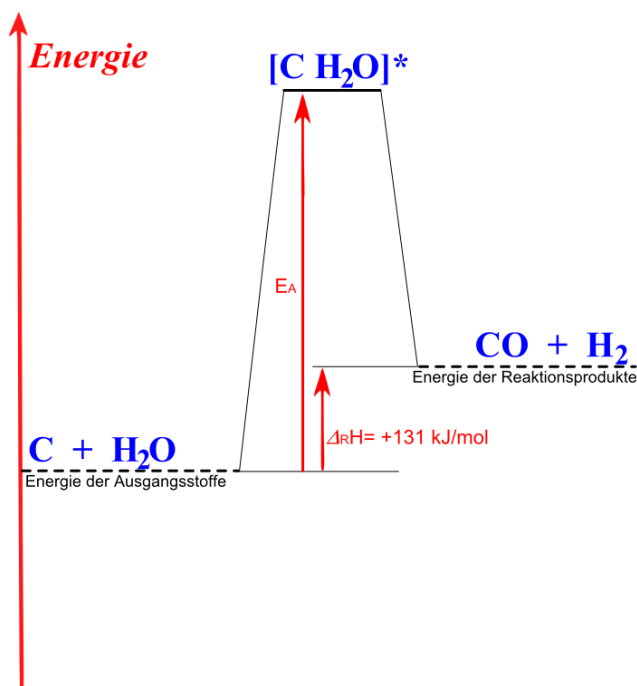
3.

## Energie-Veränderungen während einer Reaktion



Kommen wir zum Ablauf der chemischen Reaktion nach der erweiterten Stoß-Theorie zurück.

Energetisch ergibt sich der folgende Verlauf, den wir typischerweise in einem Energie-Niveau-Schema darstellen. Hierdrin (s.a. Abb. rechts) werden die verschiedenen Energie-Niveaus der reagierenden Stoffe sowie ev. Zwischen-Schritte / -Situationen dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass ein Energie-Niveau-Schema niemals bei einer 0-Energie beginnt. Diesen Wert kann ein Stoff / ein chemisches System niemals erreichen oder besitzen. (Selbst in der Physik ist das Erreichen einer 0-Energie für einen Stoff etc. nicht möglich.) Wir können somit auch praktisch nicht die genaue (innere) Energie ermitteln, die ein Stoff hat. Was aber möglich ist – und von der Physik zur Perfektion gebracht wurde – ist die Ermittlung von Energie-Differenzen.



Energieniveau-Schema einer einfachen Reaktion

Gibt ein Stoff Energie ab oder nimmt er sie auf, dann lässt sich das sehr genau feststellen. Bei den wenigsten Stoff-Kombinationen kommt es sofort zu einer Reaktion, wenn sie denn überhaupt möglich ist. Praktisch haben nur sehr wenige Teilchen die notwendige Energie um bestimmte Bindungen bei dem anderen Stoff aufzubrechen und einen aktivierten Komplex zu bilden. Die, für eine Reaktion notwendige Energie wird **Aktivierungs-Energie  $E_A$**  genannt. Das A deutet nicht nur auf die Aktivierung hin, sondern ist auch eine Hommage an den Entdecker dieser Größe Svante ARRHENIUS (1859 - 1927). Für seine Arbeiten erhielt ARRHENIUS 1903 einen der ersten NOBEL-Preise für Chemie.

Ist die Aktivierungs-Energie nicht sehr hoch, dann werden relativ viele Teilchen die notwendige Energie für einen effektiven Zusammenstoß haben. Der gebildete Übergangs-Komplex aus beiden Reaktions-Partnern hat jetzt zwei Möglichkeiten. Beide Möglichkeiten sind zufällig. In der ersten Möglichkeit wandelt sich der Übergangs-Komplex so um, dass die Reaktions-Produkte entstehen. Im anderen Fall trennt sich der Übergangs-Komplex wieder in die Ausgangs-Teilchen auf. Die Reaktion ist nicht vollzogen worden. Vielleicht klappt es beim nächsten Zusammenstoß.

Je größer die Aktivierungs-Energie, umso weniger Teilchen haben die notwendige Energie für eine Reaktion ( $\rightarrow$  BOLTZMANN-Verteilung der Energie).

Im nebenstehenden Diagramm sieht man die Verteilungen der Teilchen mit einer bestimmten Energie nach BOLTZMANN. Betrachtet werden hier beispielhaft Stickstoff-Moleküle.

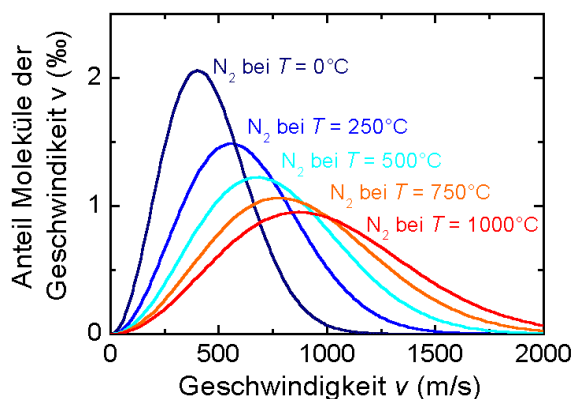
Die Abszisse gibt die Geschwindigkeit vor, für welche die vorhandenen Teilchen (mit eben genau dieser Geschwindigkeit) abgetragen wurden.

Die Geschwindigkeit und die kinetische Energie sind äquivalente Größen. Je größer die Geschwindigkeit, umso größer ist auch die (kinetische) Energie des Teilchens.

Nehmen wir nun an, für eine Reaktion bräuchten die Stickstoff-Moleküle die Geschwindigkeit von 1'000 m/s. Aus der schwarzen Kurve können wir ersehen, dass bei 0 °C (= 273 K) praktisch keine Teilchen mindestens diese Energie haben. Die Reaktion kann bei dieser Temperatur also nicht stattfinden. Bei 250 °C (blaue Kurve) wird dieser Wert wenigstens von einigen – vielleicht auch nur ganz wenigen – Teilchen erreicht. Diese könnten dann auch reagieren. Nach und nach bekommen auch die anderen Teilchen durch normale Stöße mal die notwendige Energie und können sich dann ebenfalls umwandeln. Die Reaktion läuft vergleichsweise langsam.

Ganz anders sieht das bei 1'000 °C aus. Nun haben alle Teilchen – rechts von der gedachten senkrechten Linie bei 1'000 m/s – die notwendige Energie. Da werden deutlich mehr effektive Zusammenstöße stattfinden und somit die Reaktion auch deutlich schneller ablaufen. Die Temperatur-Erhöhung ist eine der typischen Möglichkeiten die Aktivierungs-Energie zu erreichen. Dieser Zusammenhang steckt hinter der RGT-Regel.

Die charakteristische Aktivierungs-Energie einer Reaktion wird durch die Temperatur-Erhöhung selbst nicht verändert, sie liegt immer bei einem bestimmten Wert (bei den angegebenen Bedingungen!). In Abhängigkeit von der Temperatur verändert sich nur die Anzahl der Teilchen, die den notwendigen Energie-Wert (eben die Aktivierungs-Energie) überschreiten.



Abhängigkeit der Teilchenzahlen mit einer bestimmten Bewegungs-Geschwindigkeit von der Temperatur  
Q: de.wikipedia.org (Kai11)

### Definition(en): Aktivierungs-Energie

Die Aktivierungs-Energie ist der Energie-Wert, den Reaktionspartner haben müssen, um einen Übergangs-Komplex für eine chemische Reaktion zu bilden.

Die Aktivierungs-Energie ist die Energie-Barriere, die von den Partnern einer chemischen Reaktion überwunden werden muss, um die Reaktion vollziehen zu können.

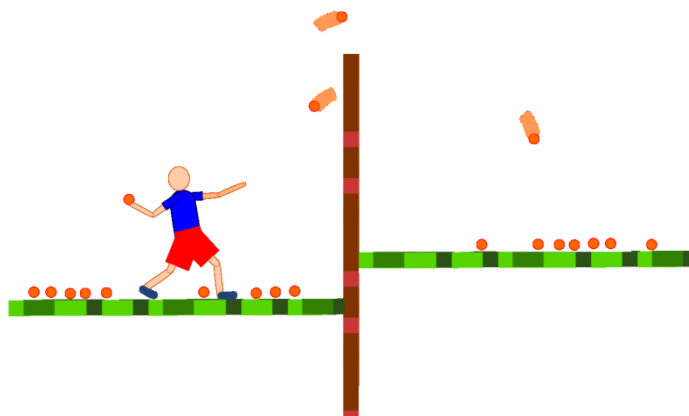
### **böse Fragen zwischendurch:**

*Ist die Angabe von Promille im obigen Diagramm nach BOLTZMANN nicht falsch? Wäre da nicht Prozent die eigentlich richtige Angabe? Setzen Sie sich mit dem Problem auseinander!*



Die Temperatur-Abhängigkeit der Reaktions-Geschwindigkeit wird auch zu Bestimmung der Aktivierungs-Energie nach **ARRHENIUS** genutzt. Die Nutzung der **ARRHENIUS**-Gleichung erläutern wir weiter hinten (→ [Berechnung der Aktivierungs-Energie](#)).

Recht intuitiv ist das nebenstehende einfache Modell einer Reaktion. Ein Sportler hat auf seiner Seite einer Mauer ein Reservoir an Wurf-Objekten (Äpfel, Bälle, ...). Diese stellen den umzuwandelnden Stoff dar. Befinden sich die Wurf-Objekte auf der anderen Seite der Mauer, dann sind sie in das Reaktions-Produkt umgewandelt (z.B. sind die Äpfel jetzt matsch). Die Höhe der Mauer stellt die Aktivierungs-Energie dar.

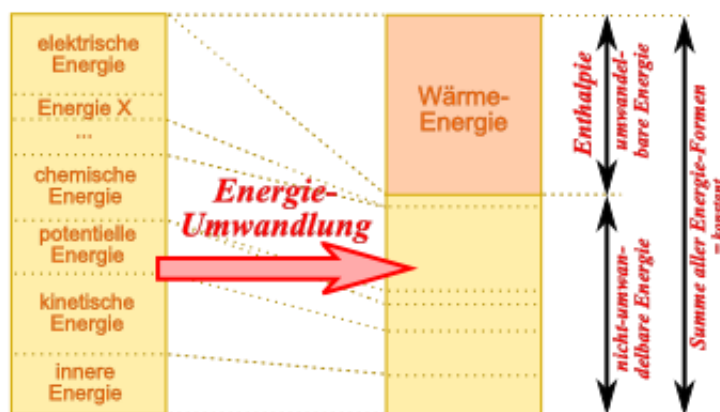


Modell einer einfachen Reaktion

Wenn man davon ausgeht, dass der Werfer sich seine Kräfte gut einteilt, dann wird er mal das eine Wurf-Objekt gleich beim ersten Mal hinüberwerfen, für andere braucht er mehrere Anläufe.

Die Spitze der Mauer ist der Scheide-Punkt (Übergangs-Zustand), über den nur die Objekte mit der notwendigen Bewegungs-Energie kommen. Die schwächer geworfenen Objekte kommen wieder in den Bereich der Ausgangsstoffe zurück.

Die Differenz der Elektronegativität zwischen den Atomen einer neu zu knüpfenden Bindung liefert eine ungefähre annähernde Information über die Größe der Bildungs-Energie (Reaktions-Energie). Je größer die Differenz, umso größer ist auch die frei-werdende Energie. Kleine Elektronegativitäts-Differenzen deuten auf kleine Reaktions-Energien hin. Hierbei kommen sowohl Energie-Aufnahmen (endotherme Reaktionen) als auch Energie-Abgaben (exotherme Reaktionen) in Frage.



### Exkurs: Gibt es ein Perpetuum mobile? (1)

Viele Wissenschaftler und Charlatane haben sich schon auf die Suche begeben, um eine Maschine zu finden / konstruieren / bauen, die ewig läuft. Ein erweitertes Ziel ist es dann auch noch Energie aus dieser Maschine abzuzweigen.

Ewig laufende Maschinen ohne weitere Energiezufuhr werden Perpetuum mobile (lat. für "sich ständig Bewegendes") genannt. Die Mehrzahl heißt übrigens Perpetua mobilia.

Ein Perpetuum mobile wäre vor allem deshalb interessant, weil es einem oder mehreren Hauptsätzen der Thermodynamik widersprechen würden. Damit wäre dann zwangsläufig deren Ungültigkeit bewiesen. Z.Z. sind die Hauptsätze nur Erfahrungen, von denen es nach unserem jetzigen Kenntnisstand keine Ausnahmen gibt. Dem Ersten, der ein Perpetuum mobile präsentieren kann, dem würde sicher eine hohe Anerkennung zuteil werden.

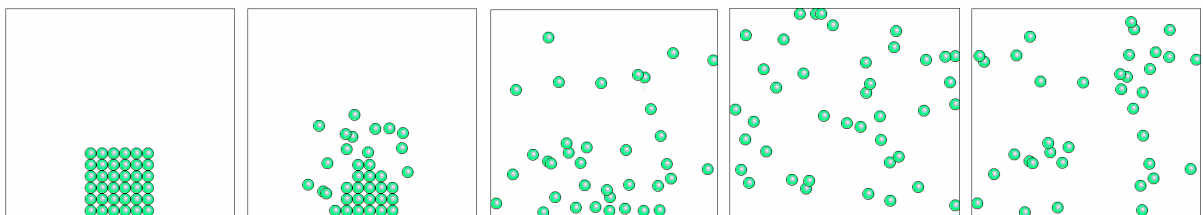
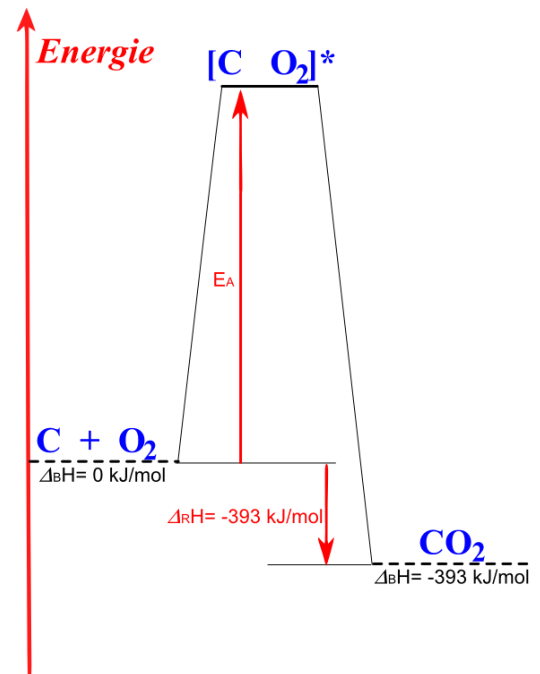
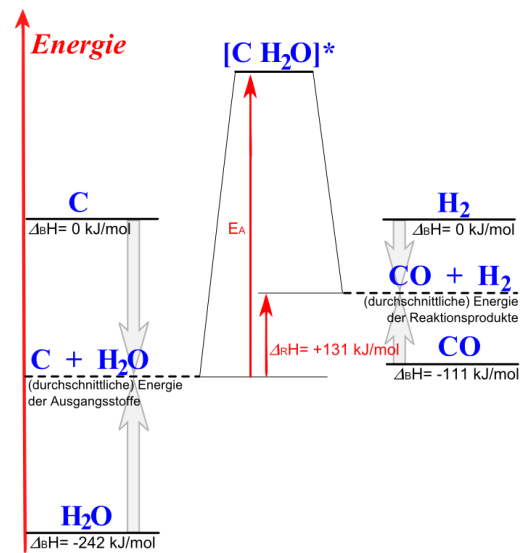
Der Erste Hauptsatz besagt, dass Energie nicht neu entstehen kann, nicht verschwindet und in der Summe (aller Energie-Formen) immer gleich bleibt.

Eine Maschine, die den 1. HS aushebelt, wird Perpetuum mobile der 1. Art genannt.

Erfasst man die Energie-Veränderungen bei einer chemischen Reaktion, dann spricht man von der Reaktions-Energie  $\Delta_R U$ , wenn während der Reaktion das Volumen konstant gehalten wird. Hält man dagegen den Druck konstant, dann heißt die Energie-Veränderung Reaktions-Enthalpie  $\Delta_R H$ .

In der Labor-orientierten Praxis und in den meisten Fällen auch in der freien Natur laufen chemische Reaktionen unter konstantem Druck (Atmosphären-Druck) ab, so dass üblicherweise die Reaktions-Enthalpie gemessen wird.

## 5.2.2. weiterführende Thermodynamik chemischer Reaktionen



## 5.2.2.x. Ermittlung und Berechnung von Reaktions-Enthalpien



### physikalische Grundlagen

Jeder Stoff kann in unterschiedlicher Menge Wärme auf- und abgeben bzw. speichern. Zum Einen hängt die Wärmemenge dabei von der Menge des Stoffes ab - genaugenommen von der Masse des Stoffes. Eine große Stoff-Probe kann logischerweise mehr Energie aufnehmen als eine kleine. Zum Anderen spielt die Art des Stoffes eine Rolle. Metalle lassen sich sehr gut erwärmen, kühlen aber auch schnell wieder aus. Öl, Glycerol und Wasser brauchen relativ lange, bis sie eine Wärmemenge aufnehmen, können diese aber auch sehr gut speichern und geben sie nur langsam wieder ab.

Die physikalische Größe, die das Wärme-Aufnahme-Vermögen eines Stoffes charakterisiert ist die spezifische Wärme-Kapazität  $c$ . Sie beschreibt die Wärmemenge, die für die Erwärmung von 1 g des Stoff's um 1 K (= 1 grad) notwendig ist. (Der Druck muss dabei konstant bleiben.) Für Wasser beträgt die spezifische Wärme-Kapazität  $4,19 \text{ J / g} \cdot \text{K}$ . Sie ist eine der größten im Bereich der haushalts-üblichen Stoffe. Die Einheit kann auch  $\text{kJ / kg} \cdot \text{K}$  lauten, da dann Nenner und Zähler gleichmäßig erweitert wurden.

| Stoff                 | spez. Wärme-Kapazität $c$<br>[ $\text{kJ / kg} \cdot \text{K}$ ] |  |  |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------|--|--|
| Blei                  | 0,13                                                             |  |  |
| Wolfram               | 0,13                                                             |  |  |
| Quecksilber           | 0,14                                                             |  |  |
| Zinn                  | 0,23                                                             |  |  |
| Silber                | 0,24                                                             |  |  |
| Messing               | 0,38                                                             |  |  |
| Cupfer                | 0,39                                                             |  |  |
| Zink                  | 0,39                                                             |  |  |
| Konstantan            | 0,42                                                             |  |  |
| Eisen                 | 0,45                                                             |  |  |
| Stahl                 | 0,47                                                             |  |  |
| Argon                 | 0,52                                                             |  |  |
| Porzellan             | 0,73                                                             |  |  |
| Mineralfaserwolle     | 0,80                                                             |  |  |
| Cohlendioxid          | 0,85                                                             |  |  |
| Glas                  | 0,86                                                             |  |  |
| Ziegelstein           | 0,86                                                             |  |  |
| Aluminium             | 0,90                                                             |  |  |
| Beton                 | 0,90                                                             |  |  |
| Gips / Schamotte      | 1,00                                                             |  |  |
| Luft (20 °C)          | 1,01                                                             |  |  |
| Magnesium             | 1,05                                                             |  |  |
| Natrium               | 1,23                                                             |  |  |
| Polystyrol            | 1,40                                                             |  |  |
| Butan                 | 1,66                                                             |  |  |
| Benzen (Benzol)       | 1,70                                                             |  |  |
| Petroleum             | 2,00                                                             |  |  |
| Wasser-Dampf (100 °C) | 2,08                                                             |  |  |
| Eis (0 °C)            | 2,09                                                             |  |  |
| Aceton                | 2,10                                                             |  |  |
| Methanol              | 2,40                                                             |  |  |
| Ethanol               | 2,43                                                             |  |  |
| Wasser                | 4,19                                                             |  |  |
| Helium                | 5,19                                                             |  |  |
| Wasserstoff           | 14,32                                                            |  |  |

## Kalorimetrie

Bei der klassischen Kalorimetrie macht man sich die große Wärme-Kapazität des Wasser's zunutze. In einem geschlossenen Gefäß im Innern lässt man eine Reaktion ablaufen. Um das Reaktions-Gefäß herum ist eine bestimmte Wasser-Menge angeordnet. Sie soll die von der Reaktion gebildete Wärmemenge aufnehmen. Dadurch, dass dies relativ langsam passiert – Wasser ist schließlich ein schlechter Wärme-Leiter – kann man die Temperatur-Veränderungen sehr gut verfolgen. Ein Rührer sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Wärme.

Oft ist die Kalorimetrische Bombe, wie man das Ganze auch nennt, nach außen nochmals Wärme-isoliert. So sollen Wärme-Verluste noch weiter verhindert werden.

Die Reaktion im Innenraum kann z.B. elektrisch gezündet werden.

Da ist vor allem deshalb praktisch, weil man Spannung und Stromstärke einfach messen kann und dann leicht zur elektrischen Arbeit verrechnen kann. Diese muss ja der ermittelten Wärmemenge wieder abgezogen.

Kurz vor, während und nach der Reaktion wird die Temperatur des Wasser-Körper's regelmäßig gemessen. Man benötigt ja die Temperatur-Differenz für die Wärmemengen-Berechnung.

Die Messwerte werden dann zuerst einmal graphisch dargestellt.

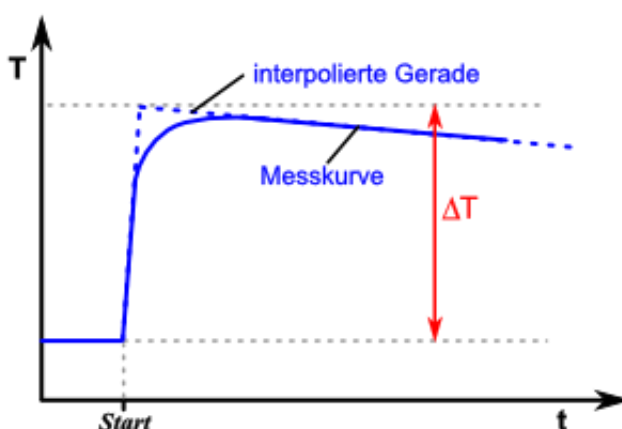
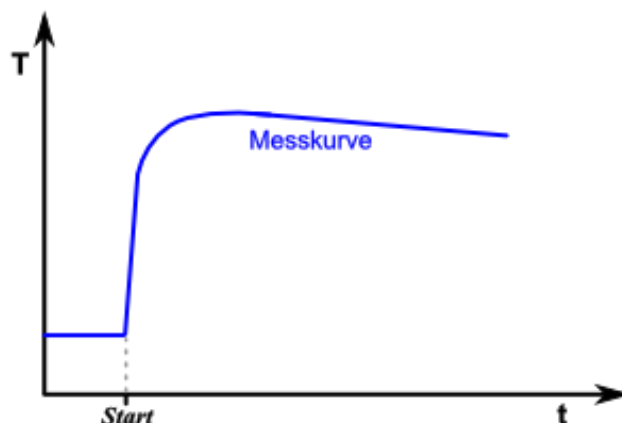
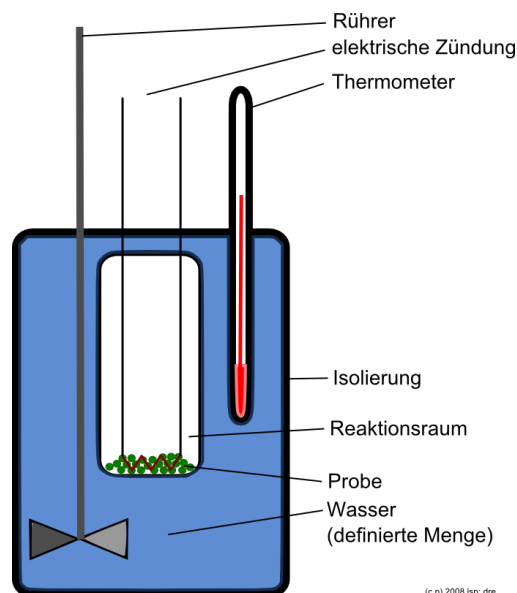
Weil jedes Kalorimeter immer auch eine Wärmeabgabe hat und die Wärme im Wasser nur schwach geleitet wird, ergibt sich nie eine exakte, ablesbare Temperatur-Differenz. Die genaue Temperatur-Differenz wird interpoliert: (siehe Abb.)

Die von der Reaktion gebildete Wärmemenge kann man über die spezifische Wärme-Kapazität berechnen:

$$Q = -c_W[H_2O] \cdot m[H_2O] \cdot \Delta T$$

Mit der Masse des Wasser's ist diejenige gemeint, welche die Wärme einer Reaktion / eines Vorgang's aufnimmt bzw. an den Vorgang abgibt. Klassischerweise sind die echten Kalorimeter mit einer festen Masse Wasser bestückt.

Bei unseren Hilfs-Kalorimetern wird die Masse wahrscheinlich jedes Mal neu eingerichtet. Trotzdem ist exaktes Abwiegen hier wichtig für einigermaßen exakte Ergebnisse.



Ist eine Korrektur hinsichtlich der Zündung notwendig, dann ergibt sich:

$$Q_{\text{exakt}} = Q_{\text{Mess}} - W_{\text{Zünd}}$$

mit z.B.:  $W_{\text{Zünd}} = W_{\text{elek}} = U \cdot I \cdot t_{\text{Zünd}}$

### Aufgaben:

**1. Bei der Reaktion von Salzsäure und Natriumhydroxid in einem Kalorimeter wurden die folgenden Messwerte aufgenommen.**

Umgebungs-Temperatur: 22 °C

Luftdruck: 101,3 kPa

Versuch-Nr.: 4

Reaktions-Start nach 1 Minute

**Kalorimeter:**

Wasser-Menge: 350 ml

Geräte-Masse: 1,2 kg

Baujahr: 1986

Quecksilber-Termometer

Rührer-Geschwindigkeit: 2 Umdrehungen pro min

| Zeit [min]      | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Temperatur [°C] | 27,3 | 29,0 | 29,1 | 28,8 | 28,6 | 28,4 | 28,1 | 27,8 | 27,6 | 27,2 | 26,9 |

**Ermitteln Sie die Reaktionswärme!**

- 2. Kann man mit einem Kalorimeter auch für eine endotherme Reaktion (z.B. notwendige Temperatur 40 °C) die Reaktionswärme ermitteln? Erläutern Sie die notwendigen Veränderungen am Versuchsaufbau oder begründen Sie, warum dies nicht geht!**
- 3. Wie müsste ein Kalorimeter gebaut sein, in dem man Reaktionen mit extremer Hitze-Freisetzung vermessen kann? Begründen Sie die notwendigen Veränderungen!**

Für die Verfolgung von Reaktionen in einem Kalorimeter müssen diese einige Bedingungen erfüllen:

- sie sollten weitgehend vollständig ablaufen
- sie sollten relativ schnell ablaufen
- sie sollten eine ausreichend große Reaktions-Wärme besitzen (praktisch also eine deutliche Temperatur-Veränderung erzeugen)

Somit sind z.B. Veresterungen ausgeschlossen. Sie sind zu langsam, bilden Gleichgewicht deutlich entfernt vom vollständigen Stoff-Umsatz und erzeugen zu geringe Temperatur-Unterschiede.

Für die exakte Berechnung der Reaktions-Wärme muss auch der Geräte-Fehler (Wärme-Verluste / -Abstrahlung) beachtet werden. Diesen Fehler fasst man im  $C_K$ -Wert zusammen. Das ist die Wärme-Kapazität des Kalorimeters.

### Wärme-Kapazität

Unter der Wärme-Kapazität **C** versteht der Physiker die Wärme(menge), die einem Körper zugeführt werden muss, damit dieser seine Temperatur um 1 K erhöht.

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Benutzt man nun auch die Grundgleichung der Wärme-Lehre:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

dann erhält man:

$$C = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{\Delta T} = c \cdot m$$

Energie-Bilanz des Kalorimeter-Systems

$$Q_1 = Q_2 + C_K$$

$$\underbrace{m_1 \cdot c \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_M)}_{\text{vom warmen Wasser abgegebene Wärmemenge}} = \underbrace{m_2 \cdot c \cdot (\vartheta_M - \vartheta_2)}_{\text{vom kalten Wasser aufgenommene Wärme}} + \underbrace{C \cdot (\vartheta_M - \vartheta_2)}_{\text{vom Kalorimeter aufgenommene Wärme}}$$

### Definition(en): Wärme-Kapazität

Die Wärme-Kapazität ist die Wärme(menge), die einem Körper / System zugeführt bzw. entnommen werden muss, damit bei diesem die Temperatur um 1 K (= 1 grad) erhöht bzw. verringert wird.

### Wärme-Kapazität eines Kalorimeter's

Die Wärme-Kapazität eines Kalorimeter's ist quasi ein Ausdruck für die Exaktheit eines Kalorimeter's. Bevor man ein Kalorimeter für exakte Messungen benutzt, testet man es erst mit einer bekannten Wärmemenge. Eigentlich sollte man mit dem Kalorimeter genau diese Wärmemenge auch messen. Da es aber zu verzögerten Energie-Übertragungen, Wärme-Verlusten usw. usf. kommen kann, treten Fehler auf. Diese hängen praktisch vollständig von der Arbeitsweise des Nutzers und vom Aufbau des Gerätes ab. Durch die Bestimmung der Wärme-Kapazität erhält man einen Korrektur-Faktor, der dann zum Anpassen der späteren Messwerte genutzt wird.

Zum Bestimmen geht man z.B. so vor:

Nehmen wir an, dass der Reaktions-Raum 100 ml Wasser fassen kann. Dann wird das Kalorimeter mit 50 ml Wasser mit einer Temperatur von 20 °C gefüllt. Die Umgebung und das Gefäß sollten ebenfalls eine Temperatur von 20 °C aufweisen. Nun füllt man z.B. 50 ml heißes Wasser mit einer Temperatur von 60 °C dazu. Nach dem 1. HS sollte die Misch-Temperatur bei exakt 40 °C liegen. Wird diese Temperatur nicht erreicht, was eben typisch ist, dann hat das Gerät selbst ein Teil der Wärme aufgenommen und / oder ist durch die Nutzung (Öffnen / Verschließen) verloren gegangen:

$$Q = C_K \cdot \Delta \vartheta \quad (\text{Grundgleichung})$$

$$C_K = \frac{Q}{\Delta \vartheta} \quad (\text{umgestellt nach der Wärme-Kapazität})$$

Gebraucht werden für die exakte Berechnung neben der Gesamt-Wasser-Masse **m** auch die beiden Ausgangs-Temperaturen ( $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$ ) sowie die gemessene Misch-Temperatur  $\vartheta_M$ . Es gilt der Energie-Erhaltungssatz für beide Wärme-Energien ( $Q_1 + Q_2 = 0$ ).

$$Q_2 = (c_W \cdot m_2 + C_K) \cdot (\vartheta_M - \vartheta_2) \quad \text{(Wärmemenge, die vom Gerät / System 2 aufgenommen / gemessen wird)}$$

→ typischerweise Wasser im Kalorimeter u. Kalorimeter selbst

$$Q_1 = c_W \cdot m_1 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_M) \quad \text{(Wärmemenge, die (von der Probe / System 1) an das Gerät / System 2 abgegeben wird)}$$

→ typischerweise auszumessender Vorgang

Schrittweise Umformung nach  $C_K$ :

$$\frac{Q_2}{(\vartheta_M - \vartheta_2)} = c_W \cdot m_2 + C_K$$

...

$$C_K = \frac{Q_2}{(\vartheta_M - \vartheta_2)} - c_W \cdot m_2$$

Aus dem Energie-Erhaltungs-Satz heraus lässt sich  $Q_2$  durch den negierten Wert von  $Q_1$  ersetzen:

( $Q_1$  entspricht dabei der abgegebenen Wärme und  $Q_2$  der aufgenommenen.)

$$C_K = \frac{-Q_1}{(\vartheta_M - \vartheta_2)} - c_W \cdot m_2$$

$$C_K = \frac{-(c_W \cdot m_1 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_M))}{(\vartheta_M - \vartheta_2)} - c_W \cdot m_2$$

### Aufgaben:

1. Lässt sich eigentlich auch mit **KELVIN**-Temperaturen arbeiten? Wie verändern sich dann die Berechnungs-Formeln?
2. Berechnen Sie die Wärme-Kapazität eines Kalorimeter's, wenn dieses mit 200 ml Wasser (Kalorimeter-Flüssigkeit) befüllt ist! Die Temperatur im Labor ist auf konstant 25 °C eingestellt und der Luftdruck beträgt 101,325 kPa. Für die Bestimmung wird das Kalorimeter mit exakt 105 ml Wasser befüllt (in den Reaktions-Raum), das exakt eine Temperatur von 58 °C hat. Die Misch-Temperatur wurde mit 35,8 °C bestimmt. (-716,5 J)
- 3.



---

## Bestimmung des Heizwertes von Kerzenwachs

### **Materialien / Geräte:**

leere Getränke-Dose mit Filz, Woll-Schal od.ä. umwickelt (→ einfaches Kalorimeter); Teelicht; Stativ mit Halterung für die Getränke-Dose; Digital-Thermometer (Genauigkeit 0,1 K); Waage; Wasser mit Zimmer-Temperatur

### **Durchführung / Ablauf:**

- auswiegen der leeren Getränke-Dose und des Teelichts
- befüllen der Getränke-Dose mit ungefähr 100 ml Wasser und erneutes exaktes Auswiegen
- Teelicht auf Stativ-Fuß stellen und die Getränke-Dose 3m über dem Docht positionieren
- Temperatur des Wassers bestimmen
- wenn die Temperatur des Wasser's konstant ist, dann Teelicht anzünden
- alle 30 s die Temperatur aufnehmen
- wenn die Temperatur in der Getränke-Dose um 10 K gestiegen ist, dann das Teelicht vorsichtig auspusten
- die Aufnahme weiterer Temperatur-Werte erfolgt noch ungefähr 3 min (der Maximal-Wert ist der Endwert)
- Teelicht erneut auswiegen

### **Berechnungen:**

- aus der Temperatur-Erhöhung und der Wasser-Menge die (vom Kalorimeter) aufgenommene Wärmemenge ermitteln
- aus den Teelicht-Massen die verbrannte Menge an Wachs errechnen
- die erzeugte Wärmemenge zur verbrannten Masse Wachs in Beziehung setzen
- Fehler-Rechnung: laut Tafelwerk Heizwert  $HW_u$  [Paraffin] = 41 kJ/g

---

## Verfolgung der Energie-Freisetzung bei einer Reaktion

### **Materialien / Geräte:**

einfaches Kalorimeter; 50 ml Salzsäure 1M; Zink-Stück; Digital-Thermometer (Genauigkeit 0,1 K)

### **Durchführung / Ablauf:**

- Aufbau des Kalorimeters
- Einfüllen von 50 ml 1M Salzsäure-Lösung in den Reaktions-Raum des Kalorimeter's
- Temperatur der Lösung bestimmen und dokumentieren
- wenn die Temperatur des Wasser's konstant ist, dann Zink-Stück in die Salzsäure geben
- alle 30 s die Temperatur aufnehmen
- die Aufnahme weiterer Temperatur-Werte erfolgt solange, bis die Temperatur 3 min durchgehend gesunken ist bzw. gleich bleibt

### **Berechnungen:**

- aus der Temperatur-Erhöhung und der Wasser-Menge (Salzsäure) die (vom Kalorimeter) aufgenommene Wärmemenge ermitteln

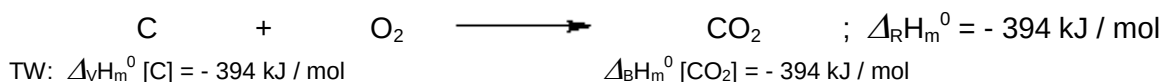
### **Fehlerbetrachtungen:**

- Überlegen Sie sich, wieso man bei der genutzten Reaktion keine Berechnung der Enthalpie durchführen kann!

## Satz von HESS

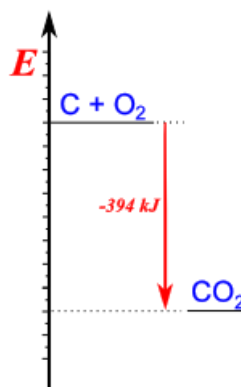


Betrachten wir die vollständige Oxidation / Verbrennung von Kohlenstoff, dann ist die ja auch gleichzeitig die Bildung von Kohlenstoffdioxid. Die Reaktions-Enthalpie ist genauso groß, wie die Verbrennungs-Enthalpie von Kohlenstoff bzw. die Bildungs-Enthalpie von Kohlenstoffdioxid. Wie wir wissen, ist dies eine stark exotherme Reaktion.

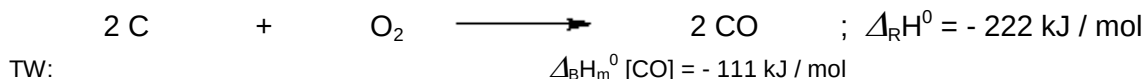


Im Energieniveau-Schema würde das dann so aussehen (s.a. Abb rechts).

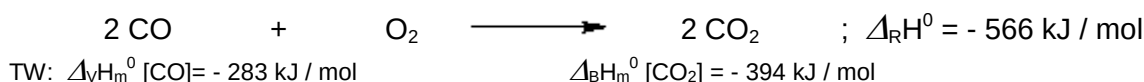
Auch andere tabellierte Werte stimmen Werte-mäßig damit überein. Das entspricht voll unserem 1. Hauptsatz der Wärmelehre / Thermodynamik.



Nun kann man aber die Verbrennung auch nur teilweise zu Kohlenstoffmonoxid durchführen:

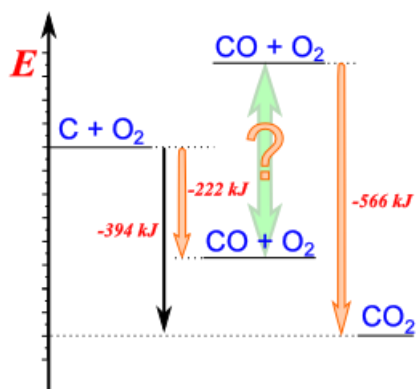


Das gebildete Kohlenstoffmonoxid kann man dann hinterher zu Kohlenstoffdioxid verbrennen:

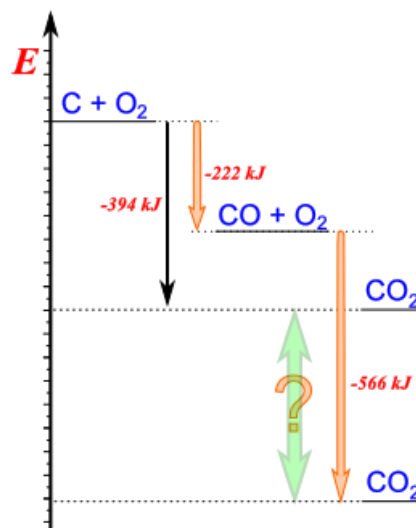


Auf diese Weise scheint man doppelt soviel (fast 800 kJ) herauszubekommen (s.a. Abb. rechts).

Allerdings kommen wir in Erklärungs-Not, wenn wir die unterschiedlichen Energie-Niveau's für Kohlenstoffdioxid deuten sollen.



Nimmt man dagegen ein einheitliches Niveau für  $\text{CO}_2$  an, dann ergeben sich unterschiedliche Niveau's für die Zwischen-Situation mit dem Kohlenstoffmonoxid (s.a. Abb. links). Irgendetwas kann hier nicht stimmen. Das könnte unsere Annahme der Energie-Erhaltung sein.



Aber auch die Annahme, dass es für jeden Stoff ein bestimmtes – vergleichbares – Energie-Niveau (bei Standard-Bedingungen gibt, wäre vielleicht zu hinterfragen).

Wenn wir genau hinsehen, dann wird der Fehler sichtbar. Natürlich dürfen wir beim zweiten Verbrennungs-Ansatz nicht auch doppelt soviel Kohlenstoff einsetzen – logischerweise ist auch die resultierende Wärmemenge doppelt so groß.

Exakt müssen wir mit folgenden Gleichungen arbeiten, die dann auch direkt mit dem obigen – vollständigen – Verbrennungs-Ansatz vergleichbar sind. Jetzt kommen auch die gleichen Energie-Mengen heraus, was unserem Energie-Erhaltungssatz entspricht.



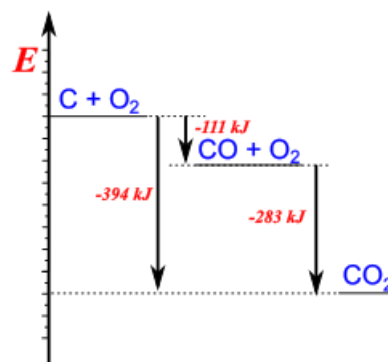
---


$$-394 \text{ kJ/mol}$$

Unsere Postulate (Energie-Erhaltung und das Vorhandensein bestimmter Energie-Niveaus) wurde hier nicht widerlegt.

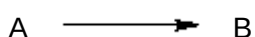
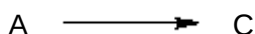
Somit ergibt sich eine logische Schlussfolgerung, zu der schon HESS im Jahre 1840 kam. Er stellte fest:

**Die Reaktions-Enthalpie einer Reaktion ist unabhängig vom Reaktionsweg. Sie hängt nur vom Ausgangs- und dem End-Zustand des Systems ab.**

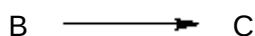


Dieses Prinzip wird auch **HESSscher Wärmesatz** genannt. Grundlage ist der Energie-Erhaltungssatz (1. Hauptsatz der Thermodynamik)

Betrachten wir eine einfache Gruppe von Reaktionen der Stoffe A, B und C.

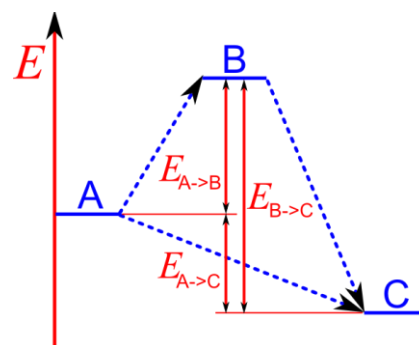


und



Mit anderen Worten Stoff C kann direkt aus A hergestellt werden, oder über eine Kette von Reaktion, die über Stoff B läuft.

Es gilt auf der Basis des Energie-Erhaltungssatzes bzw. des Satzes von HESS:



$$\Delta_R E_{A \rightarrow C} = \Delta_R E_{A \rightarrow B} + \Delta_R E_{B \rightarrow C}$$

Die Reaktions-Energie einer Reaktion von Stoff A nach C ist genauso gross, wie die Summe der Reaktions-Energien, wenn die Reaktion über das Zwischenprodukt B laufen.

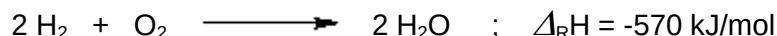
Für den Fall, dass die gesamte Energie in Form von Wärme aufgenommen oder abgegeben wird (- also keine Arbeit verrichtet wird -) gilt:

$$\Delta_R H_{A \rightarrow C} = \Delta_R H_{A \rightarrow B} + \Delta_R H_{B \rightarrow C}$$

Die Aufnahme bzw. Abgabe von Energie für einen beliebigen (chemischen) Vorgang ist unabhängig von den eingeschlagenen Reaktions-Wegen im Betrag immer gleich. Die Energie der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff ist immer gleich. Dabei ist es egal, in welcher Form die Reaktion abläuft oder in welcher Form die Energie frei wird. Läuft die gleiche Reak-

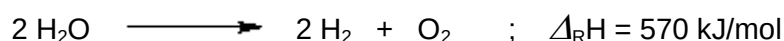
tion über mehrere Zwischen-Schritte ist der Gesamt-Wert am Schluss genau so groß, als wenn die Reaktion direkt abgelaufen wäre.

Für die Oxidation von Wasserstoff kennen wir viele – scheinbar völlig andersartige – Abläufe, und trotzdem ist es immer die Reaktion:



Mal ist es die einfache Knallgas-Probe als Quasi-Nachweis für Wasserstoff. Es kann aber auch das autogene Schweißen oder Brennen von Stahl sein. Die Brennstoff-Zelle basiert – zu mindestens, wenn Wasserstoff als Ausgangsstoff eingesetzt wird, ebenfalls auf der obigen Gleichung. Und ganz im Stillen und bei gerade einmal Körper-Temperatur läuft die Reaktion in unseren Zellen in der Atmungskette ab und liefert die Energie ganz fein portioniert (als ATP) für alle unsere körperlichen und geistigen Aktivitäten.

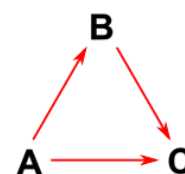
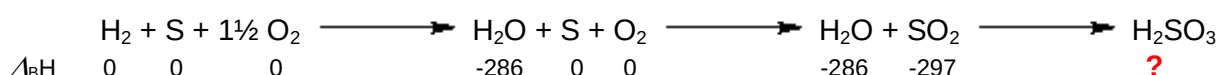
Wird die Reaktion andersherum betrieben – z.B. bei der Elektrolyse des Wassers, dann wird genau der entgegengesetzte Energie-Betrag gebraucht.



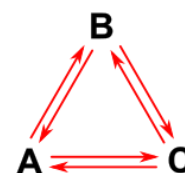
Häufig wird deshalb beim **Satz von HESS** auch vom **HESSschen Kreislauf-Prozess** gesprochen. Im weitesten Sinne entspricht der oben dargestellte Vorgang mit seinem Alternativ-Weg einem Kreis. Die Reaktionen können hin- und her abgelaufen werden lassen, immer sind die Energie-Beträge der Veränderungen bzw. die Summen der Einzel-Energien von abwegigen Veränderungen gleich groß.

Da beliebig viele Zwischen-Schritte für einen anderen Reaktions-Weg möglich sind, lässt sich der Satz von HESS zum Berechnen beliebiger Bildungs- oder Reaktions-Enthalpien benutzen. Einzige Bedingung ist die exakte stöchiometrische Abbildung. Werden z.B. doppelte Stoffmengen verwendet, dann muss auch die doppelte Enthalpie benutzt werden.

Betrachten wir eine mehrstufige Reaktion zur Bildung von schwefliger Säure:



Satz von HESS  
bei gerichteten Reaktionen



Satz von HESS  
bei umkehrbaren Reaktionen

Für eine allgemeine chemische Reaktion mit den entsprechenden Bildungs-Enthalpien:



gilt:

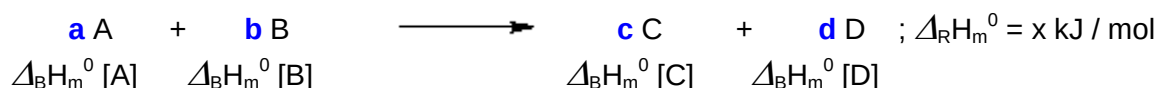
$$\Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^0 [\text{A}] + \Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^0 [\text{B}] + \Delta_{\text{R}}H_{\text{m}}^0 = \Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^0 [\text{C}] + \Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^0 [\text{D}]$$

oder:

$$\Delta_{\text{R}}H_{\text{m}}^0 = (\underbrace{\Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^0 [\text{C}] + \Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^0 [\text{D}]}_{\text{Produkte}}) - (\underbrace{\Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^0 [\text{A}] + \Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^0 [\text{B}]}_{\text{Edukte}})$$

Die Reaktions-Enthalpie ist also die Differenz aus der Summe der Bildungs-Enthalpien aller Produkte und der Summe der Bildungs-Enthalpien der Edukte.

Muss man eine von 1 abweichende Stoffmenge beachten, dann lässt dies so ausdrücken:



$$\textcolor{blue}{a} \cdot \Delta_{\text{B}} H_{\text{m}}^0 [\text{A}] + \textcolor{blue}{b} \cdot \Delta_{\text{B}} H_{\text{m}}^0 [\text{B}] + \Delta_{\text{R}} H^0 = \textcolor{blue}{c} \cdot \Delta_{\text{B}} H_{\text{m}}^0 [\text{C}] + \textcolor{blue}{d} \cdot \Delta_{\text{B}} H_{\text{m}}^0 [\text{D}]$$

oder:

$$\Delta_{\text{R}} H^0 = (\textcolor{blue}{c} \cdot \Delta_{\text{B}} H_{\text{m}}^0 [\text{C}] + \textcolor{blue}{d} \cdot \Delta_{\text{B}} H_{\text{m}}^0 [\text{D}]) - (\textcolor{blue}{a} \cdot \Delta_{\text{B}} H_{\text{m}}^0 [\text{A}] + \textcolor{blue}{b} \cdot \Delta_{\text{B}} H_{\text{m}}^0 [\text{B}])$$

Mit Hilfe der Summen-Formel bekommt man es dann noch etwas allgemeiner und übersichtlicher hin:

$$\Delta_{\text{R}} H^0 = \sum (\textcolor{blue}{v} \cdot \Delta_{\text{B}} H_{\text{m}}^0 [\text{Prod}]) - \sum (\textcolor{blue}{v} \cdot \Delta_{\text{B}} H_{\text{m}}^0 [\text{Eduk}])$$

### Definition(en): Satz von HESS

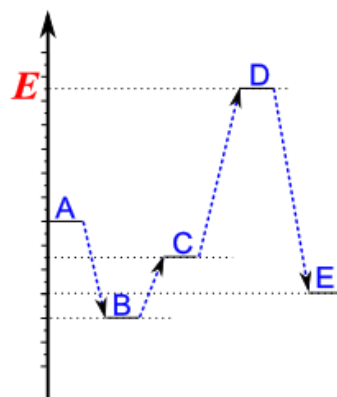
Die Enthalpie-Änderung des Gesamt-Prozesses ist genauso groß, wie die Summe der Enthalpie-Änderungen für die Einzel-Schritte.

Die Enthalpie-Änderung eines System's ist unabhängig vom Reaktionsweg. Sie wird nur durch die Differenz der Enthalpie-Zustände nach und vor der Reaktion bestimmt.

Unter Einbeziehung der Entropie S (Maß für die Unordnung) lässt sich der Satz von HESS auf die GIBBS-Energie (→ [die GIBBS-HELMHOLTZ-Gleichung](#)) erweitern.

### Aufgaben:

1. Berechnen Sie die molare Standard-Reaktions-Enthalpie für die Reaktion von Schwefeldioxid zu Schwefeltrioxid! (Zielwert:  $-198 \text{ kJ/mol}$ )
2. Bei der Herstellung von Brannkalk ( $\text{CaO}$ ) aus Calciumcarbonat wird nebenbei Kohlenstoffdioxid frei. Berechnen Sie die molare Standard-Reaktions-Enthalpie! Überlegen Sie sich, wieso das Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) auch Brannkalk genannt wird! ( $179 \text{ kJ/mol}$ )
3. Gegeben sind die folgenden Reaktionen. Zur Vereinfachung gehen wir hier von Ein-Stoff-Reaktionen aus.



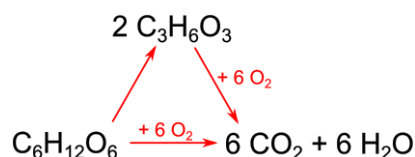
Berechnen Sie die Reaktions-Enthalpie für die theoretischen Reaktionen:

- a)  $\text{A} \longrightarrow \text{C}$  ( $-1,5 \text{ kJ/mol}$ )
- b)  $\text{A} \longrightarrow \text{D}$  ( $5,5 \text{ kJ/mol}$ )
- c)  $\text{A} \longrightarrow \text{E}$  ( $-3 \text{ kJ/mol}$ )
- d)  $\text{B} \longrightarrow \text{E}$  ( $1 \text{ kJ/mol}$ )

Prüfen Sie, ob Ihre berechneten Werte mit einer graphischen Lösung übereinstimmen!

4. Ermitteln Sie die molare Lösungs-Enthalpie (Reaktions-Enthalpie) für das Lösen von Natriumchlorid in Wasser! (Die Kennwerte von gelösten / aquatisierten Ionen sind in vielen Tafelwerken in extra Tabellen gesammelt!) ( $4 \text{ kJ/mol}$ )
5. Berechnen Sie die Standard-Verbrennungs-Enthalpie von Hexan! Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit einem Meßwert von  $-2060 \text{ kJ/mol}$  prozentual! ( $-2198 \text{ kJ/mol}$ ;  $6,28 \%$ )

6. Nebstehend finden Sie ein Schema zur Beziehung von Glucose, Milchsäure und den Abbau-Produkten Kohlendioxid und Wasser in der Zell-Atmung, Milchsäure-Gärung sowie einem Abbau der Milchsäure zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ .



- a) Prüfen Sie, ob der Satz von HESS auf chemischer und biochemischer Ebene gilt! Begründen Sie Ihre Meinung mit exakten Zahlen / Werten!
- b) Bewerten Sie in diesem Zusammenhang auch den praktischen Energie-Gewinn von 2 ATP bei der Milchsäure-Gärung und 36 ATP bei der Zell-atmung! Für die Umwandlung der Milchsäure in Kohlendioxid und Wasser wird i.A. kein Energie-Gewinn bzw. -Bedarf angegeben.
- c) Kann das so überhaupt sein? Setzen Sie sich mit dem Sachverhalt auseinander!

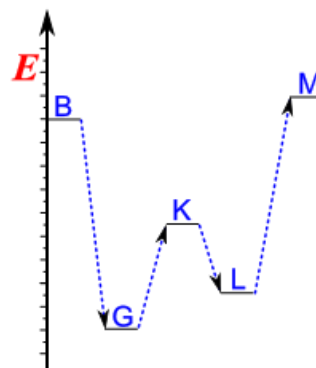
7. Die Substanz F kann auf unterschiedlichen Wegen reagieren. Welche Reaktions-Enthalpie ist für die Reaktion  $I \longrightarrow J$  zu erwarten? Geben Sie eine graphische und eine rechnerische Lösung an! (  $\text{kJ/mol}$  )



Aufgaben für die gehobene Anspruchsebene:

8. Gegeben ist das nebenstehende Reaktions-Schema und die Reaktions-Enthalpie für die Reaktion  $K \longrightarrow L$  mit  $-3 \text{ kJ/mol}$ . Berechnen Sie die Reaktions-Enthalpie für die folgenden Reaktionen:

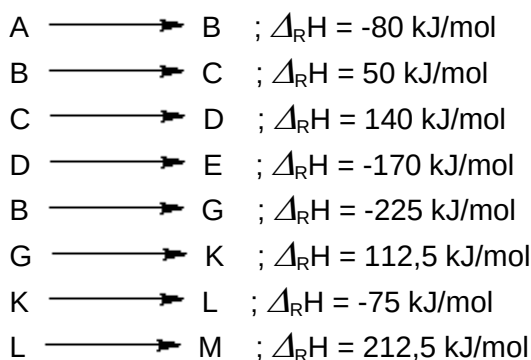
- $B \longrightarrow G$
- $B \longrightarrow K$
- $G \longrightarrow M$
- $L \longrightarrow B$



9. Ist es möglich für eine gedachte Reaktion

$A \longrightarrow D$  eine Reaktions-Enthalpie zu berechnen? Wenn ja, dann berechnen Sie diese, ansonsten begründen Sie, warum dies nicht geht!

10. Kann man eine Reaktions-Enthalpie für die gleiche Reaktion berechnen, wenn die folgenden geänderten Bedingungen bestehen?



Wenn ja, dann berechnen Sie diese, ansonsten begründen Sie, warum dies nicht geht!

---

## Kann eine endotherme Reaktion auch freiwillig ablaufen?



Bisher ließ sich nur eine Aussage darüber machen, ob eine chemische Reaktion Energie aufnehmen muss oder welche abgibt.

Aber läuft eine Reaktion freiwillig ab? Und, wenn es Hin- und Rück-Reaktion gibt, welche läuft dabei freiwillig ab? Oder gibt es da dann keine Richtung.

zwei Prinzipien bestimmen das Reaktions-Verhalten maßgeblich:

Prinzip des Energie-Minimum's

Prinzip der maximalen Unordnung

die Prinzipien für sich stehen immer für einen freiwilligen Verlauf's / einer Reaktion kommt es bei einer Reaktion sowohl zur Verringerung der inneren Energie, als auch zu einer höheren Unordnung, dann läuft sie immer freiwillig schwierig wird es, wenn beide Prinzipien gegeneinander wirken, dann stellt sich die Frage, welcher Effekt stärker ist

Für exotherme Reaktionen scheint die Erklärung einfach und plausibel. Wenn die Reaktion einmal begonnen hat – z.B. durch die Zuführung von ausreichend Aktivierungs-Energie – dann reagieren die Stoffe durch. Schließlich wird immer wieder Energie freigesetzt, die dem Rest-Stoff(-Gemisch) genug Energie zum Weiterreagieren liefert. Solche Reaktionen laufen freiwillig ab. Dazu gehören z.B. Oxidationen.

Andere Beispiele sind:

Reaktion von Eisen(-Pulver) mit Schwefel

Reaktion einer Säure mit einer Base (Neutralisation):

katalytische Zersetzung von Wasserstoffperoxid mit Braunstein:

Reaktion von Natrium mit Chlor

veraltete Alchemisten-Regel

Je größer die Reaktions-Energie, umso heftiger ist die Reaktion bzw. umso größer ist die Affinität der Ausgangsstoffe (zueinander).

Dies stimmt auch mit der alten Regel von BERTHELOT (1827 – 1907) überein. In dieser formulierte er, dass eine exotherme Reaktion immer freiwillig abläuft. Dies impliziert die Gegen-Aussage, dass eben endotherme Reaktionen niemals freiwillig ablaufen.

???



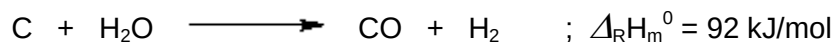
---

*Problem: Kondensation und Erstarrung müssten spontan ablaufen*

Frage nach der Freiwilligkeit einer chemischen Reaktion

Frage, warum einige Reaktionen bei höheren Temperaturen laufen oder aber andere nicht mehr von statten gehen.

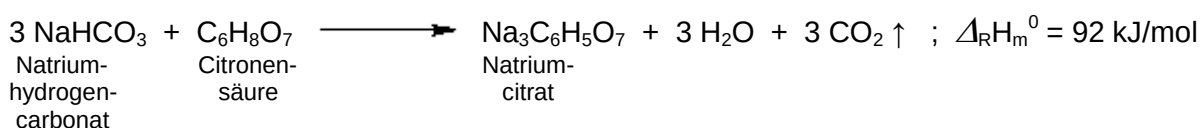
So muss man z.B. für die Reaktion von Kohlenstoff mit Wasser(-Dampf) Temperaturen von rund 750 °C erzeugen.



Dagegen funktioniert die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff – sonst ja eigentlich ein Muster-Beispiel von Reaktions-Freude (→ Knallgas-Reaktion) – bei über 5800 °C nicht mehr.

Da die Reaktions-Enthalpie praktisch nicht von der Temperatur abhängt, muss der Effekt woanders herkommen.

Ein anderes Phänomen ist die scheinbare eindeutige Richtung bestimmter Reaktionen. So lässt sich eine Brause-Tablette in Wasser auflösen.

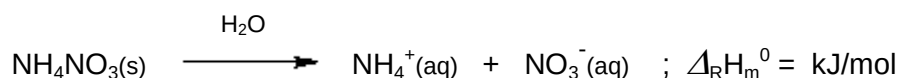


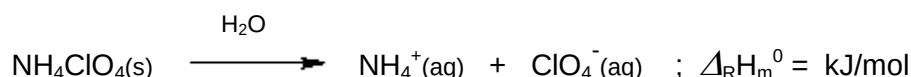
oder etwas Säure-Base-betonter:



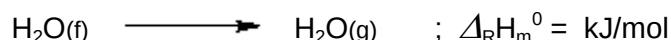
Der umgekehrte Vorgang der Rückbildungen ist aber niemals möglich, selbst wenn man das gebildete Kohlenstoffdioxid in einem geschlossenen System behalten würde. (übrigens: Auch ein isoliertes System brächte hier keinen Erfolg.)

Weitere Beispiele für Reaktionen, für die die Regel von BERTHELOT nicht gilt sind:





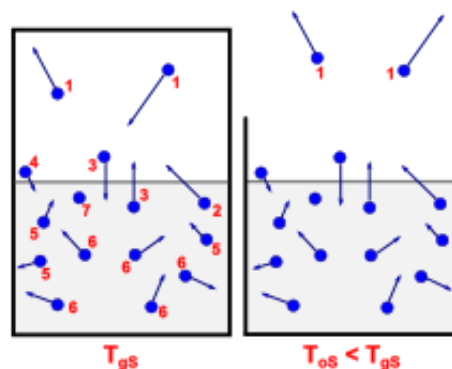
Auch das Wäsche-Trocknen bei niedrigen Temperaturen / ... im Wind / Verdunsten von Wasser:



widerspricht den Erwartungen lt BERTHELOT.

Schauen wir uns die Vorgänge bei einer Flüssigkeit – wie z.B. eben dem Wasser – etwas genauer an.

In einem (ab-)geschlossenem System bildet sich ein Gleichgewicht zwischen der gasförmigen und flüssigen Phase aus. Im Gas-Zustand finden wir vorrangig Teilchen (Nr. **1**) mit einer größeren Energie (Geschwindigkeit). Nur mit dieser konnten sie (z.B. Nr. **2**) die zwischenmolekularen Anziehungs-Kräfte in der flüssigen Phase überwinden und die Phase verlassen. Manche Teilchen (**3**) haben genau so viel Energie, dass sie sich im Gleichgewicht von Kondensieren und Verdampfen / Verdunsten befinden. Teilchen (**4**), die in der gasförmigen Phase ihre Energie an andere übertragen haben, fallen in die flüssige Phase zurück. Die meisten Teilchen in der flüssigen Phase (**5 + 6**) haben eine mittlere Energie.



Sie reicht für die Bewegung in Form einer Flüssigkeit, aber nicht für den Gas-Zustand. Einige wenige Teilchen (**7**) haben zeitweilige nur sehr wenig oder keine bewegungs-Energie. Mit dem nächsten Zusammenstoß bekommen sie diese von anderen Teilchen. Im Schnitt bleibt die Energie im abgeschlossenen System konstant.

In einem offenen System können die Teilchen mit der höheren Energie (**1**) den Nahbereich verlassen. Sie werden kaum wieder in die flüssige Phase zurückkehren. Da immer nur die Teilchen mit der hohen Energie austreten und dann "verschwinden", nimmt die mittlere Energie (Geschwindigkeit) immer mehr ab. Zurück bleiben die Teilchen mit einer ungenügenden Energie für den Phasen-Übergang. Die sinkende mittlere Energie (Geschwindigkeit) präsentiert sich uns als sinkende Temperatur. Durch Verdunstung sinkt also die Temperatur des offenen Systems ( $T_{\text{os}}$ ) im Vergleich zur Temperatur eines abgeschlossenen System ( $T_{\text{gs}}$ ).

### Aufgaben:

1. Soll Wasser bei 25 °C verdampfen (verdunsten) ist dafür eine Energie von 44 kJ/mol notwendig. Berechnen Sie die Temperatur des Wasser's, wenn aus einem sonst Energie-isolierten Gefäß 10 ml Wasser verdampft sind!
2. Durch die Sonnenstrahlung gelangt eine wirksame Energie rund 350 W pro Quadratmeter auf die Erde. Welche Menge Wasser muss verdunstet werden, damit bei:
  - a) einem Tümpel mit einer Wasser-Fläche von 78,5 m<sup>2</sup>
  - b) einem Laubblatt mit 20 cm<sup>2</sup>
  - c) einem Baum mit einem Kronen-Durchmesser von 10 m die (Oberflächen-)Temperatur konstant bleibt?
- 3.

---

Daraus können wir schließen, dass die Regel von BERTHELOT mehr eine Orientierung ist. Später wurde durch BOLTZMANN eine neue – Energie-äquivalente – Größe **die Ordnung** – oder besser **die Unordnung** – erkannt. In der Thermodynamik wird dieses Maß für die Unordnung **Entropie** (→ [das Maß für die Unordnung – die Entropie](#)) genannt.

---

### ergänzende Betrachtungen zur Schmelzwärme

Schmelzwärme (exakt: Schmelz-Enthalpie  $H_{fus}$ ; auch: Schmelz-Energie)  
ist die zuzuführende Wärmemenge, die benötigt wird, um einen Stoff vom festen in den flüssigen Zustand zu überführen

spezifische Schmelz-Enthalpie  $h_{fus}$ :

$$h_{fus} = \frac{H_{fus}}{m}$$

molare Schmelz-Enthalpie  $H_{m,fus}$ :

$$H_{m,fus} = \frac{H_{fus}}{n}$$

Schmelz-Enthalpie  $\Delta_{fus}H$ :

$$\Delta_{fus}H = H_{(l)} - H_{(s)}$$

$$\Delta_{fus}U = U_{(l)} - U_{(s)} \quad H = U + p \cdot V$$

$$\Delta_{fus}H = \Delta_{fus}U + p \cdot (V_{(l)} - V_{(s)})$$

die **Erstarrungswärme** ist der negative Wert der Schmelzwärme

### ergänzende Betrachtungen zur Verdampfungswärme

Verdampfungswärme (exakt: Verdampfungs-Enthalpie  $H_v$ ; auch: Verdampfungs-Energie  $Q_v$ )  
ist die zuzuführende Wärmemenge, die benötigt wird, um einen Stoff vom flüssigen in den gasförmigen Zustand zu überführen

spezifische Verdampfungs-Enthalpie  $h_v$ :

$$h_v = \frac{H_v}{m}$$

molare Verdampfungs-Enthalpie  $H_{m,v}$ :

$$H_{m,v} = \frac{H_v}{n}$$

Schmelz-Enthalpie  $\Delta_vH$ :

$$\Delta_vH = H_{(g)} - H_{(l)}$$

$$\Delta_vU = U_{(g)} - U_{(l)} \quad H = U + p \cdot V$$

$$\Delta_vH = \Delta_vU + p \cdot (V_{(g)} - V_{(l)})$$

die **Kondensationswärme**  $\Delta_kH$  ist der negative Wert der Verdampfungswärme ( $\Delta_vH = -\Delta_kH$ )

die **Sublimationswärme** ist die Energie, die benötigt wird, um einen Stoff vom festen direkt in den gasförmigen Zustand zu überführen, sie ist die Summe aus Schmelz- und Verdampfungswärme

### Aufgaben zu folgendem Schüler-Experiment:

1. Lesen Sie sich die folgende Experimentier-Anordnung durch!
2. Erstellen Sie ein Protokoll bis einschließlich Durchführung! (Kann noch Kladde sein, wird vom Kursleiter abgezeichnet. Muss aber unverändert in die Reinschrift übernommen werden!)  
In den Vorbetrachtungen gehen Sie darauf ein, wie sich die zentrale Auflös- und Zersetzungs-Reaktion von Natriumhydrogencarbonat mit Citronensäure u.a. zu Natriumcitrat und Kohlenstoffdioxid thermodynamisch verhält! Analysieren Sie für alle Stoffe Aggregatzustand, Volumen, Masse und Stoffmenge! Berechnen Sie die zu erwartenden Reaktions-Enthalpie! Stellen Sie eine passende experimentelle These (am Ende der Vorbetrachtungen) auf!
3. Führen Sie das Experiment durch!
4. Vervollständigen Sie das Protokoll!

### Auflösen einer Brause-Tablette

#### **Materialien / Geräte:**

einfaches Kalorimeter (optimal doppelwandiges Glas-Gefäß (Isolier-Becher / -Tasse) mit Styropor-Deckel); Brause-Tablette, (Digital-)Thermometer (Auflösung möglichst 0,1 K); Trinkwasser (mit Zimmer-Temperatur)

#### **Durchführung / Ablauf:**

- optimales Volumen des Trinkwasser's in das Kalorimeter
- mit Thermometer beobachten, bis konstante Temperatur vorhanden ist
- Brause-Tablette einwerfen und im Abstand von 15 s Temperatur messen
- Versuch 2 min nachdem sich die Tablette vollständig aufgelöst hat oder sich die Temperatur nur noch gleichmäßig verändert, abbrechen

#### **Berechnungen:**

- Reaktions-Enthalpie bestimmen

TW+:  $\Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^{\circ}[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7] = -1'544 \text{ kJ/mol}$ ;  $\Delta_{\text{B}}H_{\text{m}}^{\circ}[\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7] = -1'880 \text{ kJ/mol}$ ;

### Feststoff-Reaktion von Natriumcarbonat mit wasserhaltigem Eisennitrat

#### **Materialien / Geräte:**

Eisen(III)-nitratnonhydrat; Natriumcarbonat; Reibschale + Pistill; Filterpapier; Porzellan-Schale (besser –Becher)  
alternative Feststoff-Kombination: Bariumhydroxidoktahydrat und Ammoniumnitrat

#### **Durchführung / Ablauf:**

- beide Salze separat fein zerreiben
- schnell auf Filterpapier mischen und in ein Porzellan-Gefäß geben
- sofort und im Abstand von 15 s die Temperatur messen
- nach rund 3 min kann man auf 30 s Mess-Abstand wechseln

## die Entropie – das Maß für die Unordnung



Der Name Entropie leitet sich aus dem griech. **en** für "in" bzw. "an" sowie von **trope** für "Wendung" ab. Es handelt sich um eine extensive Zustands-Größe, die sich proportional zur Stoffmenge verhält.

Aus der Alltags-Erfahrung wissen wir, dass sich bestimmte Vorgänge nicht wieder rückgängig machen lassen. Rollt z.B. ein rohes Ei von einem Tisch und schlägt auf dem Boden auf, dann wird es in den meisten Fällen zerbrechen und seinen Inhalt freisetzen.

Niemand wird ernsthaft behaupten er hätte schon mal das Zusammenfließen von Eiklar und Eigelb beobachtet. Daneben müsste auch noch eine heile Kalkschalen aus den vielen bruchteilen entstehen, das Ei vom Boden auf den Tisch "springen" und an den Ausgangs-Punkt zurückrollen. Nichts davon wird wahrscheinlich passieren.

Oder nehmen wir das Auflösen einer Brause-Tablette in einem Wasserglas. Wenn die Tablette ins Wasser eintaucht, beginnt sofort eine heftige Blasen-Bildung. Das Wasser trübt sich ein – oft ist auch leicht gefärbt. Am Ende löst sich die Tablette vollständig auf. Auch in diesem Fall ist die Umkehrung nicht denkbar.

Beiden Vorgängen ist gemeinsam, dass aus einem strukturierten, geordneten System ein chaotisches, ungeordnetes entsteht. Diese Entwicklungs-Richtung scheint als irgendwie das Normale zu sein.

Unordnung (kaputtes Ei bzw. aufgelöste Tablette) ist wohl ein sehr stabiler und wahrscheinlich Energie-armer Zustand. Irgendwie müssen Unordnung und Energie miteinander in Verbindung stehen.

Die Beziehung kennt praktisch jeder von sich zuhause. Unordnung entsteht praktisch von ganz allein, da braucht es nicht viel Hilfe. Wenn man dagegen aber wieder Ordnung erzeugen, dann bedarf es einer mehr oder weniger großen Menge an Energie.

BOLTZMANN (1844 - 1906) – der Begründer der statistischen Thermodynamik – interpretierte die Entropie **S** als Wahrscheinlichkeit der möglichen Mikro-Zustände eines Systems (dem (Makro)-Zustand). Die Mikro-Zustände liegen in den Teilchen selbst oder deren Anordnung / Struktur.

Er schlug die Formel:

$$S = k \cdot \ln W$$

vor. In dieser ist **W** die thermodynamische Wahrscheinlichkeit eines Systems und **k** die sogenannte BOLTZMANN-Konstante (auch:  $k_B$ ) mit:

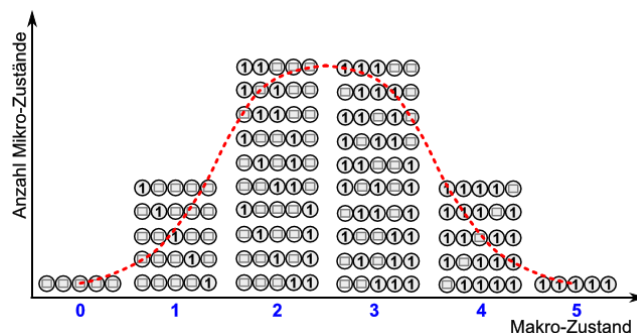
$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

Als Modell können wir eine Sammlung von 5 Münzen verwenden. Jede Münze hat ein Bild oder eine Zahl aufgeprägt. Bei jedem Wurf zeigen die Münzen einer der beiden Seiten.

Diese interpretieren wir als (Mikro-)Zustände.

Weiterhin gelten noch nebenstehende Zusammenhänge bezüglich der Entropie.

Die während einer Reaktion stattfindende Entropie-Änderung  $\Delta_R S$  lässt – ganz äquivalent zu den Enthalpien aus der Differenz der Entropien der Reaktionsprodukte und der Ausgangsstoffe berechnen:



$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

$$\Delta_R S = \sum S [\text{Prod}] - \sum S [\text{Eduk}]$$

Für die Stoffe sind für Standard-Bedingungen bestimmte Werte als molare Größe tabelliert. Im Gegensatz zur Bildungs-Enthalpie hat jeder Stoff eine Entropie.

Sinkt bei einem Vorgang die Entropie (die Ordnung wird größer), dann sprechen wir von einem exotropen Vorgang. Dagegen steigt bei einem endotropen Vorgang die Entropie (die Ordnung wird geringer).

### Abschätzen der Veränderung der Entropie

Schon beim Aufstellen von chemischen Gleichungen erhält man erste Informationen zur Entropie-Änderung. Nehmen die Menge an Teilchen (bzw. Stoffen / Stoffmengen) zu, dann ist eine Zunahme der Entropie anzunehmen.

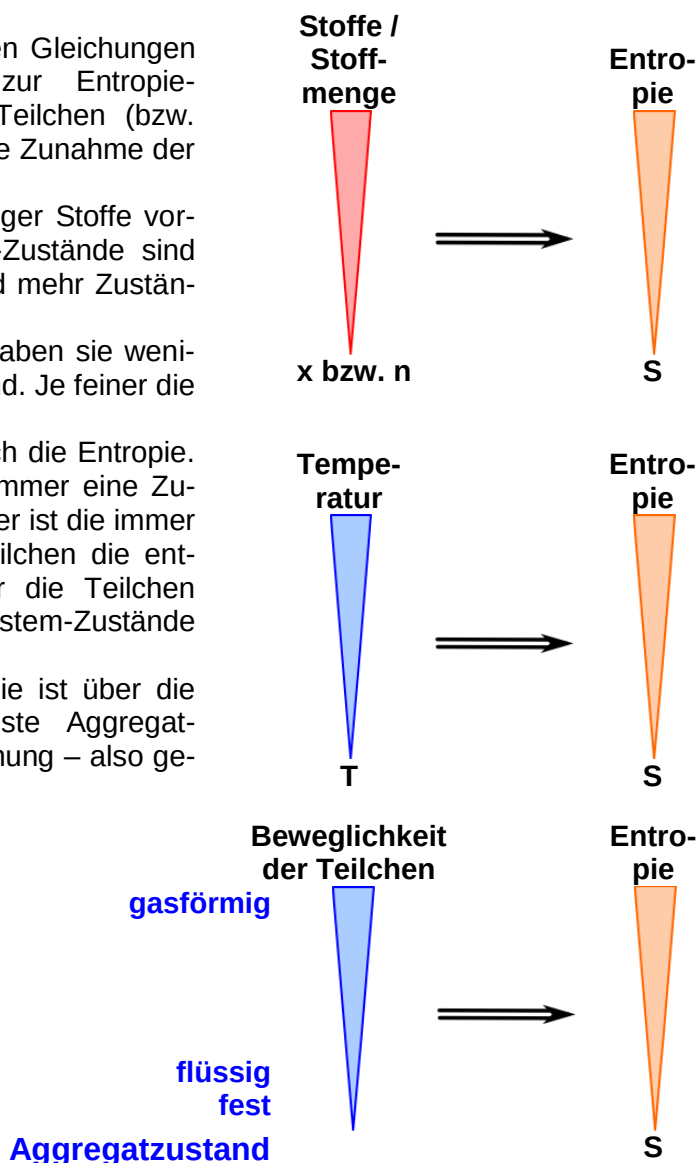
Das ist auch gut zu erklären. Je weniger Stoffe vorhanden sind, umso weniger System-Zustände sind denkbar. Mit jedem weiteren Stoff sind mehr Zustände vorhanden – die Entropie steigt.

Liegen z.B. Stoffe einzeln vor, dann haben sie weniger Entropie, als wenn sie gemischt sind. Je feiner die Verteilung, umso größer die Entropie.

Auch mit der Temperatur verändert sich die Entropie. Bei einer steigenden Temperatur ist immer eine Zunahme der Entropie zu beobachten. Hier ist die immer mehr steigende Beweglichkeit der Teilchen die entscheidende Ursache. Je beweglicher die Teilchen sind, umso mehr unterschiedliche System-Zustände sind möglich.

Eine weitere Abschätzung zur Entropie ist über die Aggregat-Zustände möglich. Der feste Aggregat-Zustand ist noch durch eine hohe Ordnung – also geringe Entropie - charakterisiert.

Die Teilchen können nur an ihren Gitter-Plätzen hin- und herschwingen. Da sind nicht viele Variations-Möglichkeiten vorhanden. Im flüssigen Zustand nehmen die möglichen System-Zustände schon deutlich zu. Dies ist eben mit einer größeren Entropie (Unordnung) verbunden. Im Gas sind alle Bewegungs-Schranken aufgehoben. Die Entropie ist jetzt am Größten.



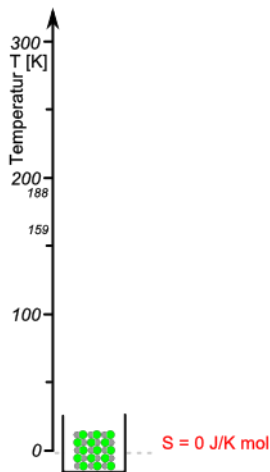
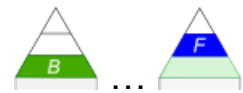
---

**Aufgaben:**

- 1. Vergleichen Sie die Standard-Entropie-Werte aus dem Tabellenbuch für die Stoffe Brom, Iod und Wasser in verschiedenen Aggregatzuständen! (Betrachten Sie die Stoffe für sich und auch im Vergleich zueinander!)*
- 2. Ein Schüler schlägt in einem besonders heißen Sommer vor, einfach in einem geschlossenen Raum den Kühlschrank zu öffnen um den Raum abzukühlen. Setzen Sie sich mit dem Vorschlag auseinander!*



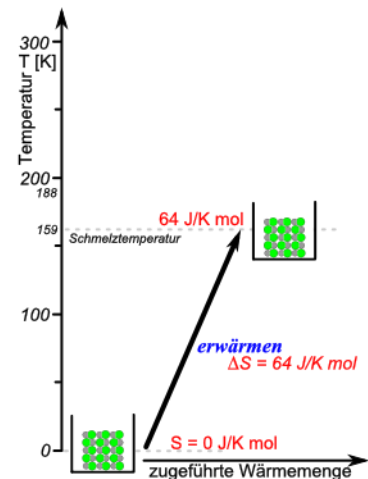
## Wie ändert sich die Entropie beim Erwärmen eines Stoff's?



Jeder Stoff hat beim absoluten Null-Punkt der Temperatur ( $T = 0 \text{ K}$ ;  $t = -273^\circ\text{C}$ ) eine Entropie von Null (s.a. Abb. links).

Eine steigende Temperatur ist ursächlich mit einer steigenden Bewegungs-Energie der Teilchen verbunden. Da viele Stoffe bei so niedrigen Temperaturen noch fest sind, können sich die Teilchen nur an der Gitter-Plätzen bewegen.

Im Fall von Chlorwasserstoff kann man die Temperatur bis knapp unter  $159 \text{ K}$  ( $-114^\circ\text{C}$ ) erhöhen. Bis hierhin ist es ein Feststoff. Die erhöhte Beweglichkeit der Teilchen wird als gestiegene Entropie deutlich.



Die Entropie-Änderung ( $\Delta S$ ) lässt sich leicht berechnen. Der positive Wert passt zu unseren Erwartungen einer steigenden Unordnung der Teilchen.

Irgendwann wird bei steigender Wärmezufuhr die Beweglichkeit so groß, dass die Teilchen sich von den Gitter-Plätzen lösen und freier beweglich werden.

Wir sprechen dann vom flüssigen Aggregatzustand.

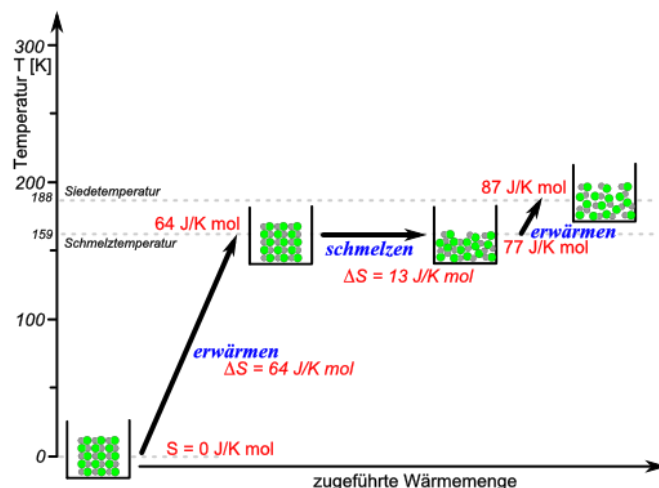
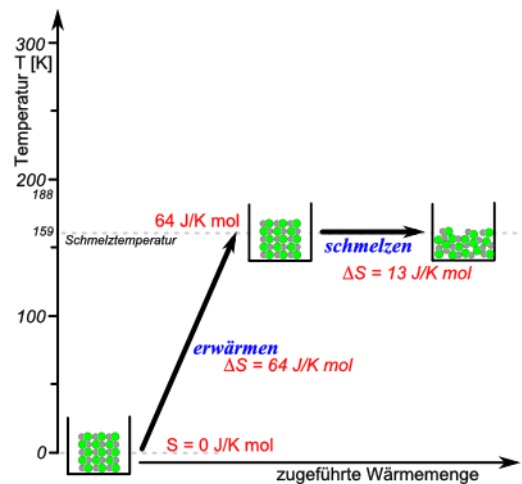
Eine weitere Energie-Zufuhr lässt den Stoff vollständig schmelzen. Da erst der gesamte Feststoff in eine Flüssigkeit gewandelt werden muss, bleibt die Temperatur auf diesem Energie-Niveau. Was sich aber immer noch ändert, ist die Entropie.

Die frei beweglichen Teilchen nehmen anteilmäßig immer mehr zu, bis alle dem flüssigen Zustand entsprechen.

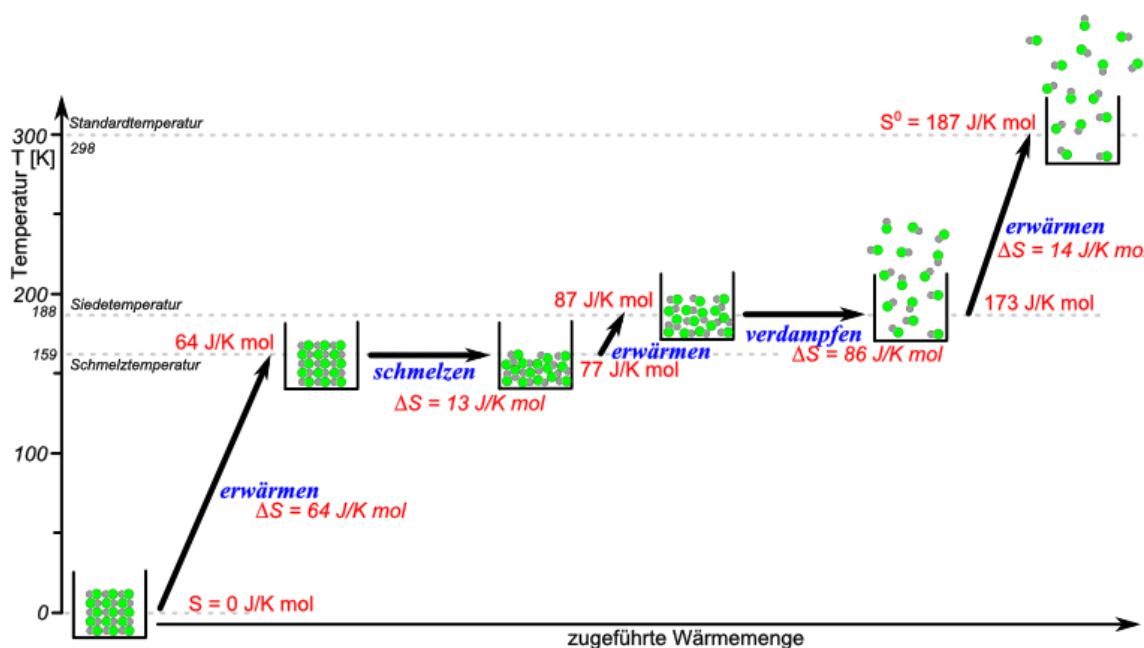
Nun wirkt sich eine zunehmende Energie-Zufuhr wieder auf eine steigende Temperatur aus. Auch die Entropie steigt weiter.

Bei  $188 \text{ K}$  ( $-85^\circ\text{C}$ ) ist die Bewegungs-Energie der Teilchen so groß, dass sie sich von anderen im flüssigen Zustand lösen können. Sie nehmen nun den gasförmigen Zustand ein.

Die Temperatur bleibt trotz weiterer Energie-Zufuhr bei der Siede-Temperatur stehen.



Erst wenn alle Teilchen "verdampft" sind, kann die Temperatur wieder weiter steigen.  
Der letzte klar definierte Punkt ist die Standard-Temperatur (25 °C = 298 K). Der jetzt erreichte und klar definierte Entropie-Wert ist die Standard-Entropie.



Nachfolgend kann weiter Energie zugeführt werden. Die Entropie wird weiter steigen. Es kommt aber zu keiner Veränderung des Aggregatzustandes mehr.

### Aufgaben:

1. Notieren Sie sich für ein Schema die drei Aggregatzustände in einem weiten Dreieck! Geben Sie zwischen den Zuständen die Namen der Übergänge (z.B. schmelzen) an und notieren Sie dazu, ob es sich um einen exotropen oder endotropen Vorgang handelt!
2. Erstellen Sie jeweils ein passendes Diagramm zu den Mikro- und Makro-Zuständen für ein 4- und 6-Münz-Modell (Es reicht nur K und B oder z.B. 0 und 1 für die Elementar-Zustände zu benutzen!)? Was können Sie daraus für große Münz-Zahlen ( $\rightarrow$  Teilchen-Zahlen) ableiten?
3. Laufen die folgenden Reaktionen unter Entropie-Zu- oder Abnahme ab? Begründen Sie sowohl mit Informationen aus der Reaktions-Gleichung als auch mit genauen berechneten Werten!
  - a)  $\text{H}_2(\text{g}) + \text{Cl}_2(\text{g}) \longrightarrow 2 \text{HCl}(\text{g})$
  - b)  $\text{P}_4(\text{s}) + 6 \text{H}_2(\text{g}) \longrightarrow 4 \text{PH}_3(\text{g})$  (Monophosphan-Bildung)
  - c) Ammoniumnitrat reagiert zu Distickstoffoxid und Wasser(-Dampf)
4. Wieso funktionieren Klima-Geräte im Vergleich zum geöffneten Kühlschrank in einem Raum, um diesen abzukühlen? Recherchieren Sie und erstellen Sie eine Erklärung!

---

**Definition(en): Entropie**

Entropie ist die physikalische (thermodynamische) Größe, die für beobachteten Makro-Zustand Aussagen über die möglichen Mikro-Zustände macht.

Die Entropie ist das Maß für die Unordnung.

Die Information ist das Gegenstück zur Entropie. Je geordneter ein System ist, umso mehr Information enthält es. Auch hier kann man sich das Münz-Modell zur Erklärung heranziehen.

Die häufigen Mikro-Zustände mit ein, zwei umgedrehten Münzen sind sehr wahrscheinlich. Das sie auftreten ist mit wenig Information verbunden. Liegt aber eine Situation mit jeweils gleichen Münz-Symbolen vor, dann ist dies schon etwas Besonderes. Diese Mikro-Zustände sind selten und haben also einen hohen Informations-Gehalt.

**Aufgaben für die gehobene Anspruchsebene:**

- 1. Recherchieren Sie, inwieweit die Gravitation eine Gegenkraft zur postulierten Tendenz der Entropie-Erhöhung im Weltall ist!*
- 2. Überlegen Sie sich allgemeine Aussagen (ähnlich wie bei der Entropie) zum Abschätzen der Veränderung der Information während eines Vorgang's!*
- 3.*

**Definition(en): Information**

Information ist eine der Entropie entgegengesetzte physikalische / thermodynamische Größe.

Information ist Unwissenheit beim Empfänger.

## die GIBBS-HELMHOLTZ-Gleichung



Verbindung von thermodynamischen Größen, die den Ablauf einer chemischen Reaktion charakterisieren.

verknüpft die energetischen Anteile Enthalpie und Entropie mit der Temperatur

macht Aussage, ob eine Reaktion (unter bestimmten Bedingungen) (freiwillig) abläuft

Maß ist die Freie Enthalpie G oder GIBBS-Energie

Etwas populär gesprochen ist die Freie Enthalpie ein Maß für die Arbeits-Fähigkeit eines System's. Sie nimmt i.A. mit steigen-der Entropie (Unordnung) ab.

$$\Delta G = n \cdot F \cdot \Delta E$$

G ... freie Enthalpie

n ... Gesamt-Enthalpie

F ... Temperatur

nach GIBBS kann nur ein (bestimmter) Teil der Reaktions-Wärme in Arbeit ( $\rightarrow \Delta G$ ) umgesetzt werden. Der andere Teil verbleibt in der Struktur ( $\rightarrow T \cdot \Delta S$ ):

$$\begin{array}{lcl} \Delta H & = & \Delta G \quad + \quad T \cdot \Delta S \\ \text{Enthalpie} & = & \text{für Arbeit} \quad + \quad \text{in der Struktur} \\ & & \text{verfügbare} \quad \text{gebundene} \\ & & \text{Energie} \quad \text{Energie} \end{array}$$

G ... freie Enthalpie

H ... Gesamt-Enthalpie

T ... Temperatur

S ... Entropie

Mit der in der Struktur gebundenen Energie können wir Chemiker erst einmal nichts anfangen. Uns interessiert der Teil der Energie, den wir nutzen können – also die Freie Enthalpie G:

$$\begin{array}{lcl} \Delta G & = & \Delta H \quad - \quad T \cdot \Delta S \\ \text{für Arbeit ver-} & = & \text{(Gesamt-) } - \quad \text{in der Struktur} \\ \text{fügbare Energie} & & \text{Enthalpie} \quad \text{gebundene} \\ & & \text{Energie} \end{array}$$

G ... freie Enthalpie

H ... Gesamt-Enthalpie

T ... Temperatur

S ... Entropie

Interpretation als der Teil der Enthalpie / Energie, die bei der Reaktion wirklich umgesetzt werden kann, der also nicht in der Struktur verbleibt

Ziel des Systems ist und bleibt ein möglichst geringer Gesamt-Energie-Zustand (Energie-Tal)

Ist die Freie Enthalpie kleiner Null, dann läuft die chemische Reaktion freiwillig ab. Wir nennen sie dann exergon. Dagegen verlaufen endergone Reaktionen nicht freiwillig. Sie sind durch eine Freie Enthalpie größer als Null gekennzeichnet.

Als Stellschraube eignet sich die Temperatur.

|                                                                                                         | $\Delta_R H < 0$<br>exotherm                                                                                                                       | $\Delta_R H > 0$<br>endotherm                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>exotrop</b><br><br>$\Delta_R S < 0$<br><br><b>Entropie-<br/>Abnahme</b><br>(Zunahme der<br>Ordnung)  | $\Delta_R G < 0$<br><b>exergon</b><br><br><b>nur begrenzt freiwillig</b><br><br>steigende Temp. behindert Reaktion<br><br>Rück-Reaktion erzwingbar | $\Delta_R G > 0$<br><b>endergon</b><br><br><b>nie freiwillig</b><br><br>steigende Temp. behindert Reaktion<br><br>Rückreaktion gefördert     |
| <b>endotrop</b><br><br>$\Delta_R S > 0$<br><br><b>Entropie-<br/>Zunahme</b><br>(Abnahme der<br>Ordnung) | $\Delta_R G < 0$<br><b>exergon</b><br><br><b>immer freiwillig</b><br><br>steigende Temp. fördert Reaktion<br><br>Rückreaktion behindert            | $\Delta_R G > 0$<br><b>endergon</b><br><br><b>erzwingbar</b><br><br>steigende Temp. fördert Reaktion<br><br>Rückreaktion begrenzt freiwillig |

#### Definition(en): freie Energie (HELMHOLTZ-Energie / HELMHOLTZ-Potential)

Die freie oder HELMHOLTZ-Energie  $F$  od.  $A$  ist der Teil der inneren Energie, der zur Leistung von Arbeit (durch das System) verfügbar ist.  
(Für die Chemie wird lt. IUPAC das Formelzeichen  $A$  empfohlen, die Physik nutzt lt. IUPAP weiterhin  $F$ .)

Die freie Energie ist der Teil der Energie, die bei Energie-Umwandlungen in eine andere Form umgewandelt werden kann.

Die freie Energie ist die Energie, die man benötigt, um einen Körper zu erschaffen, der mit seiner Umgebung im thermodynamischen Gleichgewicht steht.

Ein bisschen salopp gesagt, ist die freie Energie der brauchbare Anteil an Energie, der bei einem Prozess anfällt. Der Rest steckt entweder im System selbst fest oder wird als Wärme abgegeben.

#### Definition(en): exergonische Reaktion

Nimmt im Laufe einer Reaktion die freie Enthalpie ab, dann heißt die Reaktion exergonisch. Exergonische Reaktionen laufen freiwillig ab.

Eine exergonische Reaktion ist durch die Abnahme der freien Enthalpie gekennzeichnet. Sie können Arbeit leisten bzw. Energie abgeben.

### Definition(en): endergonische Reaktion

Nimmt im Laufe einer Reaktion die freie Enthalpie zu, dann heißt die Reaktion endergonisch. Endergonische Reaktionen müssen (durch Arbeit / Energie-Zufuhr) erzwungen werden.

Eine endergonische Reaktion ist durch die Zunahme der freien Enthalpie gekennzeichnet.

Aus der klassischen Physik wissen wir noch, dass alle Systeme den Zustand minimaler Energie anstreben. Dies ist aber nur die halbe Wahrheit. In die exakten Betrachtungen müssen wir auch die Unordnung mit einbeziehen. Systeme streben nämlich den Zustand minimaler Energie und maximaler Unordnung an. Dies wird auch die folgende Gleichung ausgedrückt:

$$F = E - T \cdot S$$

**für Arbeit verfügbare (freie) Energie** = **(Gesamt-) Energie** - **in der Struktur gebundene Energie**

F ... freie Energie  
H ... Gesamt-Energie  
T ... Temperatur  
S ... Entropie

Die gemeinsame Betrachtung von struktureller und freier Energie ist nun auch für die Bewertung der Freiwilligkeit von Reaktionen notwendig.

#### Video's:

<https://av.tib.eu/media/15667> (SciFox)

**Ein System befindet sich im (thermodynamischen) Gleichgewicht, wenn sich die freie Energie G im Minimum befindet.**

$$G = U - T \cdot S$$

**für Arbeit verfügbare (freie) Enthalpie** = **innere Energie** - **in der Struktur gebundene Energie**

F ... freie Energie  
H ... Gesamt-Energie  
T ... Temperatur  
S ... Entropie

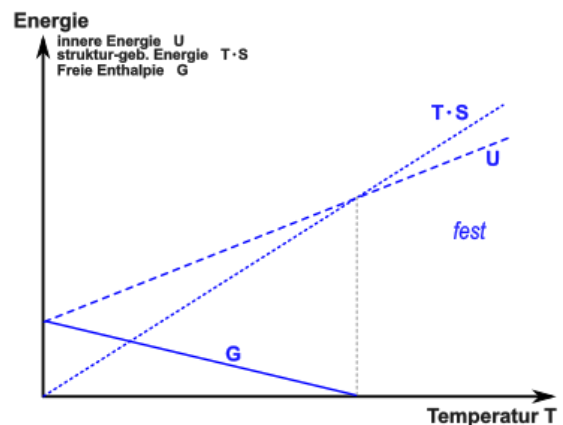
## Temperatur-Abhängigkeit der freien Enthalpie, der inneren Energie und des Entropie-Ausdrucks für die Aggregatzustände

hier imaginärer Stoff betrachtet, der bei allen Temperaturen existieren kann

hier nur fester und flüssiger Zustand betrachtet

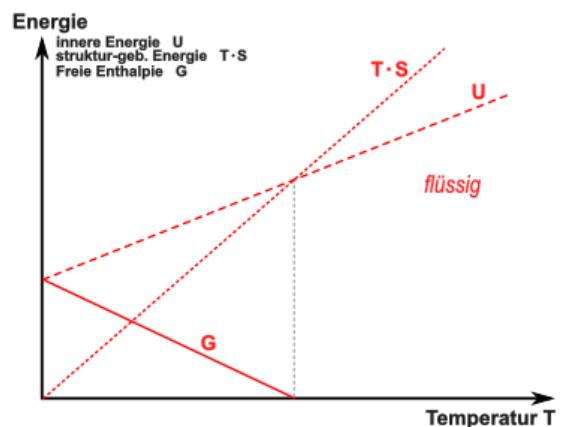
Modell-haft ist hier nur eine Veränderung der Temperatur zulässig  
es gilt also  $G = G(T)$

bei der  $T = 0 \text{ K}$  ist auch der Ausdruck  $T \cdot S$  (struktur-gebundene Energie) gleich 0



Vergleicht man z.B. den Ausdruck  $T \cdot S$  für den festen und den flüssigen Zustand, dann ist der für den flüssigen Zustand immer größer, da ja auch die Unordnung (größere Entropie) in der Flüssigkeit deutlich größer ist, als im Feststoff.

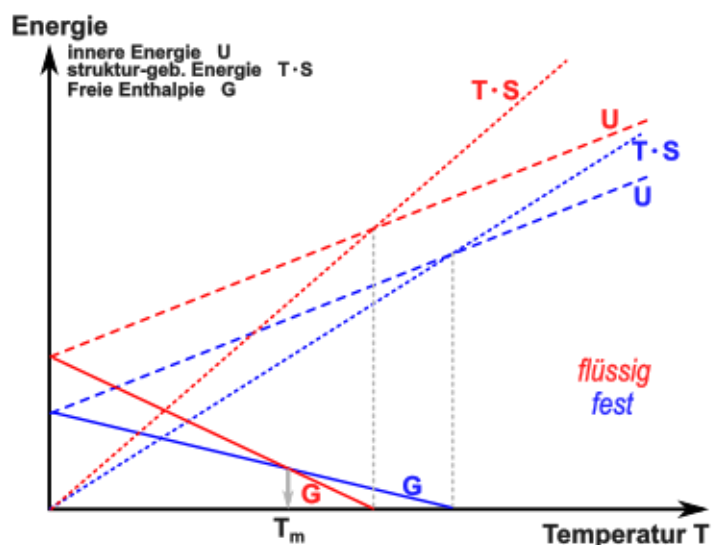
Auch die innere Energie ist in der Flüssigkeit größer. Das kommt zum Einen durch die höhere kinetische Energie (schnellere Bewegung) und zum Anderen durch freie Bindungs- und Haftungs-Möglichkeiten bedingt.



Es gibt immer eine Temperatur – die Schmelz-Temperatur (hier  $T_m$ ), bei der die freie Energie ( $G_{\text{flüssig}}$ ) kleiner ist, als die freie Energie der festen Phase ( $G_{\text{fest}}$ ).

Das bedeutet, dass Stoffe schmelzen bzw. gefrieren (erstarren), weil die freie Energie der jeweiligen Phase im Vergleich zur anderen Phase kleiner ist.

Für den Übergang von flüssig zu gasförmig gelten die obigen Betrachtungen analog.



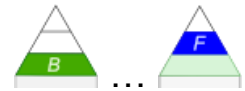
---

**Aufgaben:**

- 1.
2. *Überlegen Sie sich, wie das letzte Diagramm mit Einbeziehung des gasförmigen Zustand's aussehen müsste! Erläutern Sie Ihre Überlegungen und Skizzieren Sie ein passendes Diagramm!*
- 3.



## Freie Enthalpie oder Welche Reaktionen laufen nun wann freiwillig?



### exotherme Reaktionen mit Entropie-Zunahme ( $\Delta H < 0$ ↓; $\Delta S > 0$ ↑) exotherm + endotrop

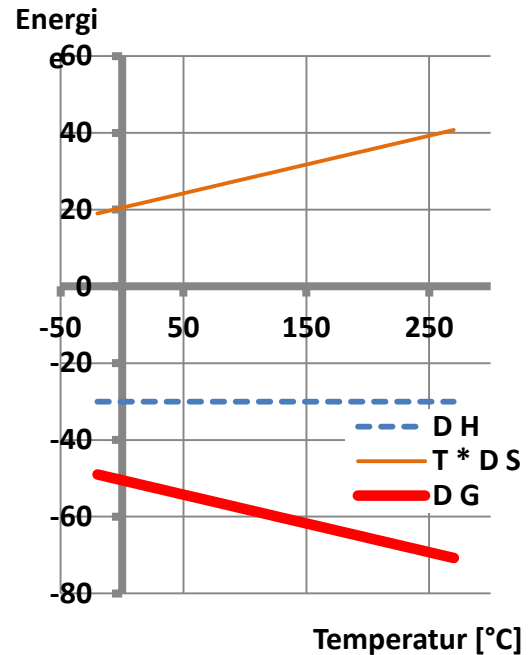
Bei solchen Reaktionen sind alle Verlaufs-Parameter optimal. Die Energie-Abgabe ermöglicht einen niedrigeren Energie-Zustand für die Produkte. Auch die Entropie-Änderung verläuft den "natürlichen" Weg.

Typische Reaktionen sind Oxidationen (Verbrennungen, ...) von organischen Stoffen.

Bei der nebenstehend betrachteten Modell-Reaktion liegt die Freie Enthalpie über den gesamten betrachteten Temperatur-Bereich von -50 bis 350 °C (rund 220 – 620 K) unter Null. Damit läuft hier die Reaktion **immer freiwillig**.

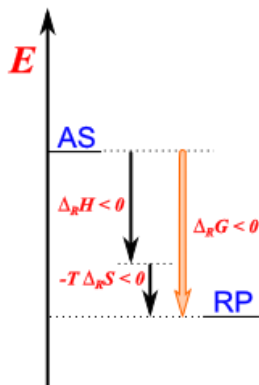
In einem Diagramm, in dem die Änderung der Freien Enthalpie (Graph: D G) gegen die Temperatur aufgetragen ist, sieht man sehr schön, dass die Freie Enthalpie immer unter Null liegt.

Betrachtet man die Verhältnisse im Energieniveau-Schema, dann ergibt sich das folgende Bild:



Modell-Werte:

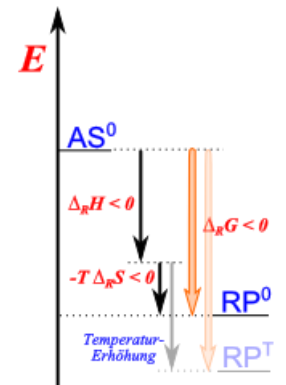
$$\Delta_R H = -30 \text{ kJ/mol}; \Delta_R S = 75 \text{ J/mol K}$$



Die negativen Ausdrücke für die Enthalpie und das Temperatur-Entropie-Produkt ergänzen sich zu einem hohen Wert für die Freie Enthalpie (**oranger Pfeil**). Die Reaktion ist exergon und läuft damit immer freiwillig ab.

Das lässt sich auch gut ableiten, wenn man im Diagramm einen – durch eine steigende Temperatur – immer größer werden Temperatur-Entropie-Wert einträgt (s.a. Abb. rechts). Die Freie Enthalpie wird immer größer (**hell-oranger Pfeil**).

Die Reaktions-Produkte haben nun einen anderen Wert der inneren Energie. Dieser liegt niedriger als der Standard-Wert.

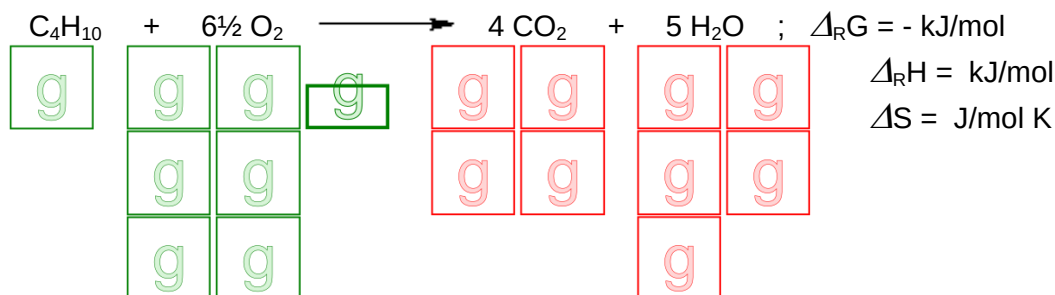


exotherm + Entropie-Zunahme

exotherm + endotrop → exergon

### Beispiele:

vollständige Oxidation (Verbrennung) von Butan:



Berechnung der freien Enthalpie (GIBBS-Enthalpie) für die Beispiel-Reaktion bei Standard-Bedingungen:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta_R H = \sum \Delta_B H [\text{Prod}] - \sum \Delta_B H [\text{Eduk}]$$

$$\Delta_R H = 4 \cdot \Delta_B H [\text{CO}_2] + 5 \cdot \Delta_B H [\text{H}_2\text{O}] - (1 \cdot \Delta_B H [\text{C}_4\text{H}_{10}] + 6,5 \cdot \Delta_B H [\text{O}_2])$$

$$\Delta_R H = 4 \cdot -393 + 5 \cdot -285 - (1 \cdot -124,5 + 6,5 \cdot 0) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right]$$

$$\Delta_R H = -2997 - (-124,5) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right]$$

$$\Delta_R H = -2872,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta S = \sum \Delta S [\text{Prod}] - \sum \Delta S [\text{Eduk}]$$

$$\Delta S = 4 \cdot \Delta S [\text{CO}_2] + 5 \cdot \Delta S [\text{H}_2\text{O}] - (1 \cdot \Delta S [\text{C}_4\text{H}_{10}] + 6,5 \cdot \Delta S [\text{O}_2])$$

$$\Delta S = 4 \cdot 214 + 5 \cdot 70 - (1 \cdot 310,5 + 6,5 \cdot 205) \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right]$$

$$\Delta S = 1206 - (1643) \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right]$$

$$\Delta S = -437 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta G = -2872,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 298 \text{ K} \cdot -437 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta G = -2872,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 130226 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta G = -2872,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 130 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta G = -2742,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \rightarrow \quad \Delta G < 0 \quad \rightarrow \quad \text{exergonisch (freiwillig)}$$

### böse Fragen zwischendurch:

1. Wann schneidet der Graph des Ausdruck's " $T \cdot \Delta S$ " eigentlich die Temperatur-Achse?
2. Wo liegt eigentlich unser immer jeweils berechneter Standard-Wert der Freien Enthalpie im Diagramm?

### Aufgabe:

1. Berechnen Sie die GIBBS-Energie und bewerten Sie die Freiwilligkeit der  
...  
a) vollständigen Oxidation von Pentan  
b) vollständigen Verbrennung von Oktan!

### exotherme Reaktionen mit Entropie-Abnahme ( $\Delta H < 0$ ↓; $\Delta S < 0$ ↓) exotherm + exotrop

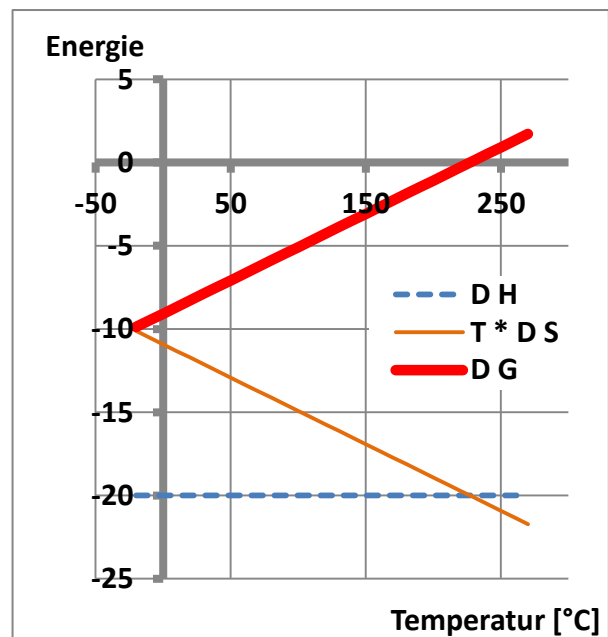
bei niedrigen Temperaturen freiwillig

da aber die Abnahme der Entropie (entspricht Zunahme der Ordnung) dem Temperatur-Verhalten der Teilchen (Zunahme der Unordnung) entgegenwirkt, beobachtet man bei einer bestimmten Temperatur (im Modell rund 220 °C) ein Übergang zur Unfreiwilligkeit.

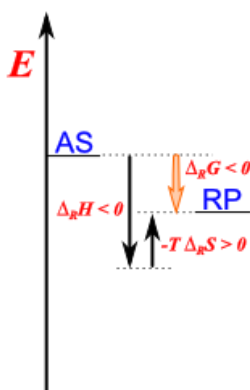
#### beschränkt freiwillig

steigende Temperaturen fördern i.A. die Zersetzung der Stoffe

viele Oxidationen, besonders von anorganischen Stoffen  
Additionen kommen in Frage, weil sie eine Verkleinerung der Teilchen-Zahl bedeuten

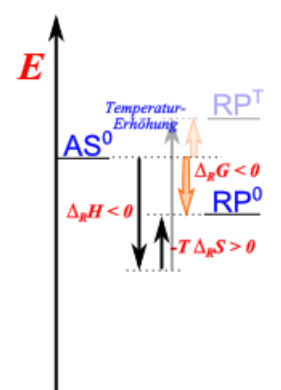


Modell-Werte:  $\Delta_R H = -20$  kJ/mol;  $\Delta S = -40$  J/mol K



Im linken Diagramm ist wieder die Energie-Situation bei Standard-Bedingungen dargestellt. Das Produkt aus Temperatur und Entropie-Änderung wirkt hier der Enthalpie-Änderung entgegen. Die Reaktion ist noch exergon.

Erhöht man allerdings die Temperatur (s.a. Abb. rechts), dann kommt es irgendwann zum Umschlagen der Reaktion in einen endergonen Vorgang. Er läuft nun nicht mehr freiwillig ab.

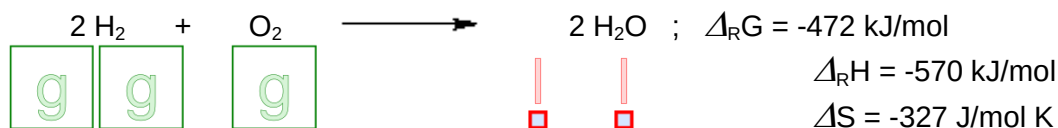


exotherm + exotrop → begrenzt exergon

exotherm + Entropie-Abnahme

### Beispiele:

Oxidation (Verbrennung) von Wasserstoff



Berechnung der freien Enthalpie (GIBBS-Enthalpie) für die Beispiel-Reaktion bei Standard-Bedingungen:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{R}}H &= \sum \Delta_{\text{B}}H [\text{Prod}] - \sum \Delta_{\text{B}}H [\text{Eduk}] \\ \Delta_{\text{R}}H &= 2 \cdot \Delta_{\text{B}}H [\text{H}_2\text{O}] - (2 \cdot \Delta_{\text{B}}H [\text{H}_2] + 1 \cdot \Delta_{\text{B}}H [\text{O}_2]) \\ \Delta_{\text{R}}H &= 2 \cdot -285 - (2 \cdot 0 + 1 \cdot 0) \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right] \\ \Delta_{\text{R}}H &= -570 - (0) \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right] \\ \Delta_{\text{R}}H &= -570 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= \sum \Delta S [\text{Prod}] - \sum \Delta S [\text{Eduk}] \\ \Delta S &= 2 \cdot \Delta S [\text{H}_2\text{O}] - (2 \cdot \Delta S [\text{H}_2] + 1 \cdot \Delta S [\text{O}_2]) \\ \Delta S &= 2 \cdot 70 - (2 \cdot 131 + 1 \cdot 205) \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] \\ \Delta S &= 140 - (467) \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] \\ \Delta S &= -327 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta G = -570 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 298 \text{ K} \cdot -327 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta G = -570 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 97446 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta G = -570 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 97,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta G = -472 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \rightarrow \quad \Delta G < 0 \quad \rightarrow \quad \text{exergonisch (freiwillig)}$$

Weitere Beispiele für exotherm und exotrop sind die Umwandlung von Stickstoffdioxid in Distickstofftetraoxid, ...

### Aufgabe:

1. Berechnen Sie die GIBBS-Energie und bewerten Sie die Freiwilligkeit der

...

a) Oxidation von Magnesium

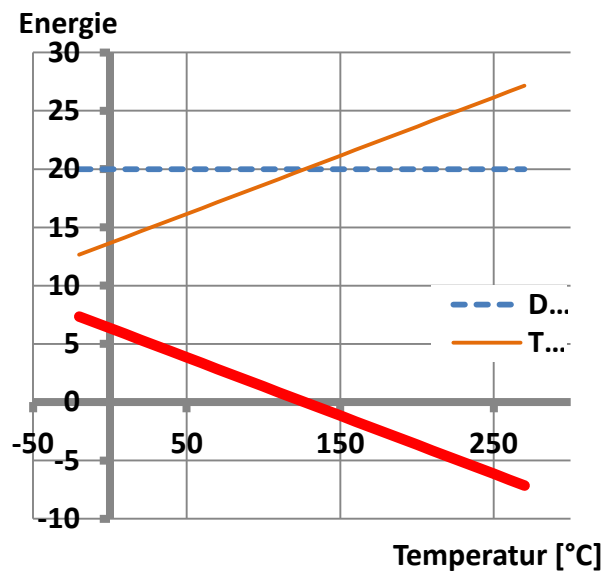
b) Oxidation von Eisen(II/III)-Oxid!

### endotherme Reaktionen mit Entropie-Zunahme ( $\Delta H > 0$ ↑; $\Delta S > 0$ ↑)

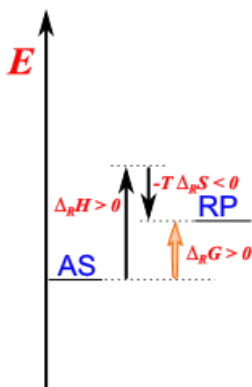
endotherm + endotrop

für endotherme Reaktionen ist eine "Start"-Temperatur typisch (im Modell: rund 130 °C). Ab dieser Temperatur läuft die Reaktion "freiwillig", sie wurde natürlich **durch die Temperatur-Erhöhung erzwungen**.

Die Freie Enthalpie ist über einer bestimmten Grenz-Temperatur dann negativ.

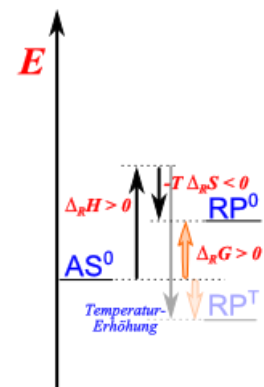


Modell-Werte:  $\Delta_R H = 20$  kJ/mol;  $\Delta S = 50$  J/mol K



Für eine endotherme Reaktion mit Entropie-Zunahme sind Wirk-Richtungen der Enthalpie und des (negativen) Temperatur-Entropie-Produkt's entgegengesetzt. Erst einmal verlaufen diese Reaktionen endergon – also nicht freiwillig.

Mittels Temperatur-Erhöhung lässt sich aber das Energie-Äquivalent der Entropie vergrößern (s.a. Abb. rechts). Dadurch kann die Reaktion (bei erhöhter Temperatur) in den freiwilligen Verlauf übergehen.

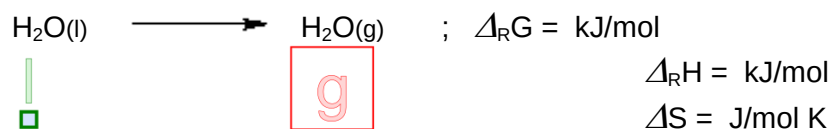


endotherm + Entropie-Zunahme

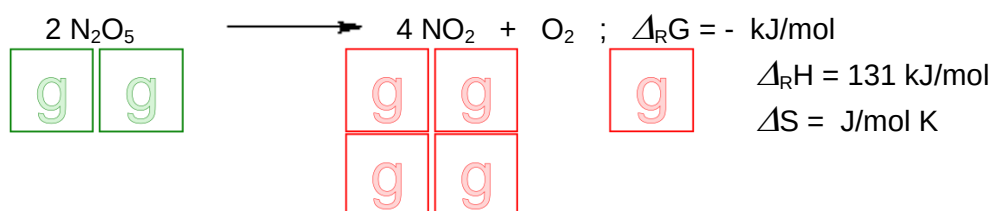
endotherm + endotrop → endergon (, aber erzwingbar exergon)

### Beispiele:

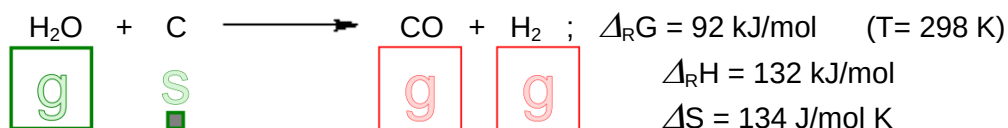
#### Verdunstung von Wasser:



#### thermischer Zerfall von Distickstoffpentoxid:



#### Wassergas-Herstellung:



Berechnung der freien Enthalpie (GIBBS-Enthalpie) für die Beispiel-Reaktion bei Standard-Bedingungen:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta_{\text{R}}H = \sum \Delta_{\text{B}}H [\text{Prod}] - \sum \Delta_{\text{B}}H [\text{Eduk}]$$

$$\Delta_{\text{R}}H = 1 \cdot \Delta_{\text{B}}H [\text{CO}] + 1 \cdot \Delta_{\text{B}}H [\text{H}_2] - (1 \cdot \Delta_{\text{B}}H [\text{H}_2\text{O}] + 1 \cdot \Delta_{\text{B}}H [\text{C}])$$

$$\Delta_{\text{R}}H = 1 \cdot -110,5 + 1 \cdot 0 - (1 \cdot -242 + 1 \cdot 0) \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right]$$

$$\Delta_{\text{R}}H = -110,5 - (-242) \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right]$$

$$\Delta_{\text{R}}H = 131,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta S = \sum \Delta S [\text{Prod}] - \sum \Delta S [\text{Eduk}]$$

$$\Delta S = 1 \cdot \Delta S [\text{CO}] + 1 \cdot \Delta S [\text{H}_2] - (1 \cdot \Delta S [\text{H}_2\text{O}] + 1 \cdot \Delta S [\text{C}])$$

$$\Delta S = 1 \cdot 198 + 1 \cdot 131 - (1 \cdot 189 + 1 \cdot 6) \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$$

$$\Delta S = 329 - (195) \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$$

$$\Delta S = 134 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta G = 131,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 298 \text{ K} \cdot 134 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

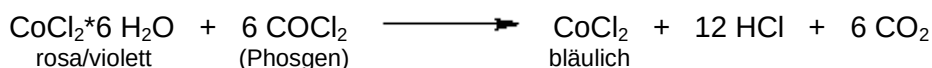
$$\Delta G = 131,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 399324 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta G = 131,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 39,9 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta G = 91,6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \rightarrow \quad \Delta G > 0 \quad \rightarrow \quad \text{endergonisch (nicht freiwillig)}$$

=====

Weitere Beispiele sind die etwas ungewöhnlichen Reaktionen von Cobalt(II)-chloridhexahydrat ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ) mit Phosgen ( $\text{COCl}_2$ ) bzw. Thionylchlorid ( $\text{SOCl}_2$ ) zu Wasser-freiem Cobalt(II)-chlorid, Chlorwasserstoff und Kohlenstoffdioxid bzw. Schwefeldioxid.



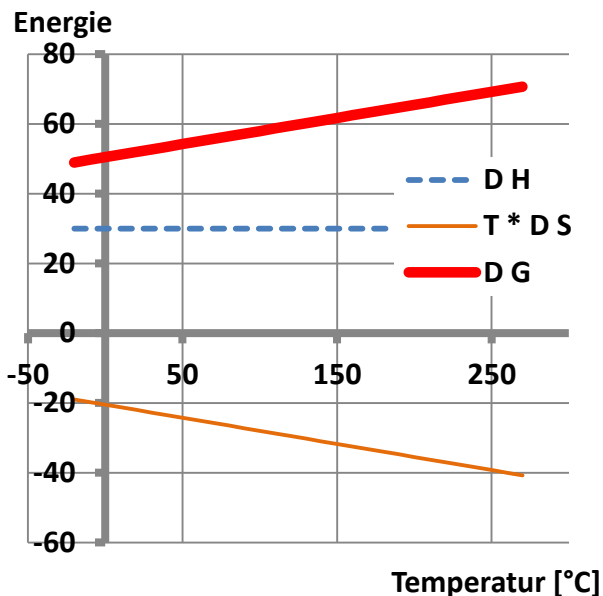
### Aufgabe:

1. Berechnen Sie die GIBBS-Energie und bewerten Sie die Freiwilligkeit der ...
  - a) Reaktion von Wasser-haltigem Cobalt(II)-chlorid ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ; Cobalt(II)-chloridhexahydrat) mit Phosgen zu Wasser-freiem Cobalt(II)-chlorid und Chlorwasserstoff und Kohlenstoffdioxid
  - b) !
2. Berechnen Sie für die Reaktionen von Aufgabe 1 die GIBBS-Energie für eine Temperatur von 0 °C! Vergleichen Sie diese mit den Werten von Aufgabe 1! Welche Schlüsse hinsichtlich der Freiwilligkeit der Reaktion bei 0°C im Vergleich zu Standard-Bedingungen können gezogen werden?

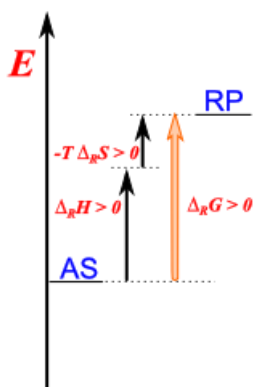
**endotherme Reaktionen mit Entropie-Abnahme ( $\Delta H > 0$  ↑;  $\Delta S < 0$  ↓)**  
**endotherm + exotrop**

Endotherme Reaktionen mit Entropie-Abnahme laufen **niemals freiwillig** ab. Auch hier widerspricht das thermische Verhalten der Teilchen bei steigenden Temperaturen (wegen der notwendigen Energie-Zufuhr) der angestrebten Entropie-Abnahme

Erzwingung durch Katalysatoren (also anderen Reaktions-Weg) oder bei anderen Bedingungen und / oder anderer Form der (notwendigen) Energie-Zufuhr



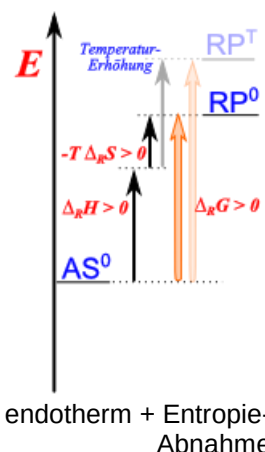
Modell-Werte:  $\Delta_R H = 30$  kJ/mol;  $\Delta S = -75$  J/mol K



Bei endothermen Reaktionen, die mit einer Entropie-Abnahme verbunden sind, summieren sich die Energie-Äquivalente von Enthalpie und dem Temperatur-Entropie-Produkt auf sehr hohe Werte.

Für die Reaktions-Produkte ist es energetisch günstiger, zurück in den Zustand der Ausgangsstoffe zu gehen. (In diesem Fall gilt ja: exotherme Reaktion mit Entropie-Zunahme. Und für diesen Fall haben wir ja schon die immerwährende Freiwilligkeit festgestellt.)

Für endotherme Reaktionen mit Entropie-Abnahme ist eine Temperatur-Erhöhung schädlich. Sie verstärkt den Effekt weiter.



**endotherm + exotrop → endergon**

**Beispiele:**

Umwandlung von Sauerstoff in Ozon



$$\Delta_R H = 286 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S = -137 \text{ J/mol K}$$

Berechnung der freien Enthalpie (GIBBS-Enthalpie) für die Beispiel-Reaktion bei Standard-Bedingungen:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$



$$\Delta_R H = \sum \Delta_B H [\text{Prod}] - \sum \Delta_B H [\text{Eduk}]$$

$$\Delta_R H = 2 \cdot \Delta_B H [O_3] - (3 \cdot \Delta_B H [O_2])$$

$$\Delta_R H = 2 \cdot 143 - (3 \cdot 0) \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right]$$

$$\Delta_R H = 286 - (0) \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right]$$

$$\Delta_R H = 286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$


---

$$\Delta S = \sum \Delta S [\text{Prod}] - \sum \Delta S [\text{Eduk}]$$

$$\Delta S = 2 \cdot \Delta S [O_3] - (3 \cdot \Delta S [O_2])$$

$$\Delta S = 2 \cdot 239 - (3 \cdot 205) \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$$

$$\Delta S = 478 - (615) \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$$

$$\Delta S = -137 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$


---

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta G = 286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 298 \text{ K} \cdot -137 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta G = 286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - -40826 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta G = 286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} + 40,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta G = 326 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \rightarrow \quad \Delta G > 0 \quad \rightarrow \quad \text{endergonisch (nicht freiwillig)}$$


---

### Aufgabe:

1. Berechnen Sie die GIBBS-Energie und bewerten Sie die Freiwilligkeit der

...

a) !

---

## Berechnung der Grenz-Temperatur / Umschlags-Temperatur

Oft brauchen wir die Temperatur, bei der eine endergone in eine exergone Reaktion umschlägt. Bei dieser Temperatur befindet sich die Reaktion quasi in einem Gleichgewicht. Von außen betrachtet passiert nichts mehr. Im Inneren laufen Hin- und Rückreaktion in gleicher Stärke ab. Die GIBBS-Enthalpie beträgt an diesem Punkt 0 kJ/mol.

Zur Berechnung der Umschlags-Temperatur nutzen wir die GIBBS-HELMHOLTZ-Gleichung und setzen  $\Delta G$  gleich Null.

$$0 = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

Diese Formel stellen wir dann schrittweise nach T um:

$$T \cdot \Delta S = \Delta H$$

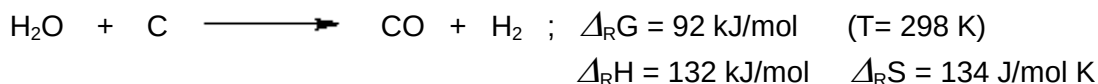
und erhalten:

$$T = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

H ... Gesamt-Enthalpie  
T ... Temperatur  
S ... Entropie

### Beispiele:

#### Wassergas-Herstellung:



$$T = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

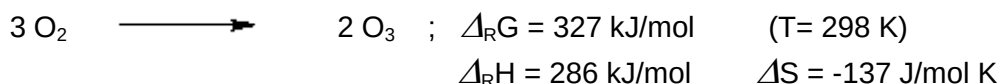
$$T = \frac{132 \text{ kJ mol K}}{134 \text{ J mol}}$$

$$T = \frac{132 \cdot 1000 \text{ J mol K}}{134 \text{ J mol}}$$

$$T = 985 \text{ K} = 712 \text{ }^\circ\text{C}$$

→ über 712 °C läuft die Reaktion "freiwillig"

#### Umwandlung von Sauerstoff in Ozon



$$T = \frac{286 \text{ kJ mol K}}{-137 \text{ J mol}}$$

$$T = \frac{286 \cdot 1000 \text{ J mol K}}{-137 \text{ J mol}}$$

$$T = -2088 \text{ K}$$

→ negative KELVIN-Temperatur ( $T < 0 \text{ K}$ ) unzulässig  
(bei keiner Temperatur erfolgt ein Umschlag  
von endergon nach exergon)

### Aufgaben:

1. In einem isobar geführten System soll festes Cobalt(II)-chloridhexahydrat (rosa bis violett) mit flüssigem Thionylchlorid ( $\text{SOCl}_2$ ;  $S^\circ = 216 \text{ J/K mol}$ ) reagieren. Berechnen Sie die molare Reaktions-Enthalpie, die Entropie-Änderung und die Freie Enthalpie für Standardbedingungen! Charakterisieren Sie die Freiwilligkeit dieser Reaktion! Bei dieser etwas ungewöhnlichen Reaktion werden neben dem Wasser-freien Cobalt(II)-chlorid (bläulich) auch noch Chlorwasserstoff und Schwefeldioxid gebildet.
2. Berechnen Sie die freie Enthalpie für die folgenden Reaktionen unter Standard-Bedingungen!
  - a)  $2 \text{ HCl} \longrightarrow \text{H}_2 + \text{Cl}_2$
  - b) Wasserstoff reagiert mit Schwefeltrioxid zu Wasser und Schwefeldioxid
  - c) Ethanol wird über einem Kupfer-Katalysator zu Ethen und Wasser umgesetzt
  - d) Bildung von Chlorwasserstoff-Gas aus den Elementen (Chlor-Knallgas-Reaktion)
3. Berechnen Sie die freie Enthalpie für die folgenden Reaktionen bei den angegebenen Temperatur-Bedingungen!
  - a)  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO} + 3 \text{ H}_2$  (Dampfreforming)
  - b) Reaktion von Stickstoff mit Wasserstoff bei  $500^\circ\text{C}$  (Ammoniak-Synthese)
  - c) Reduktion von Eisen(III)-oxid mit Kohlenstoffmonoxid bei  $2'000^\circ\text{C}$  (Hochofen-Prozess)
  - d) Verbrennung von Ethin mit Sauerstoff bei  $1'800^\circ\text{C}$  (Schweißen)
4. Laufen die folgenden Reaktionen unter Entropie-Zu- oder -Abnahme ab? Begründen Sie sowohl mit Informationen aus der Reaktions-Gleichung als auch mit genauen berechneten Werten!
  - a)  $\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) \longrightarrow \text{AgCl}(\text{s}) \downarrow$  (Fällung von Silberchlorid (Ionen-Nachweis))
  - b)  $\text{P}_4(\text{s}) + 6 \text{ H}_2(\text{g}) \longrightarrow 4 \text{ PH}_3(\text{g})$  (Monophosphan-Bildung)
  - c)  $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8 \text{ H}_2\text{O}(\text{s}) + 2 \text{ NH}_4\text{SCN}(\text{s}) \longrightarrow \text{Ba}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{ SCN}^-(\text{aq}) + 2 \text{ NH}_3(\text{g}) + 10 \text{ H}_2\text{O}(\text{l})$
  - d)  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \longrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$  (Abbinden von Beton (Zement-Wasser-Gemisch))
5. Berechnen Sie die Grenz-Temperaturen für die folgenden Reaktionen und machen Sie Aussagen dazu, ob zum exergonen bzw. endergonen Verlauf übergegangen wird!
  - a)  $4 \text{ Fe} + 3 \text{ O}_2 \longrightarrow 2 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
  - b) Natrium reagiert mit Brom zu Natriumbromid
  - c) Reaktion von Magnesium mit / in Chlor
  - d) Oxidation von Kohlenstoffmonoxid

### Exkurs: Gibt es ein Perpetuum mobile? (2)

| Enthalpie-<br>Änderung<br>$\Delta H$ | Entropie-<br>Änderung<br>$\Delta S$ | Temperatur<br>T | Änderung der<br>freien Enthalpie<br>$\Delta G$ | Reaktion ...         | steigende<br>Tempera-<br>tur ... |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| < 0<br>exotherm                      | > 0<br>Zunahme                      | egal            | $\leq 0 \rightarrow$ exergonisch               | spontan / freiwillig |                                  |
|                                      | < 0<br>Abnahme                      | klein / niedrig | $\leq 0 \rightarrow$ exergonisch               | spontan / freiwillig |                                  |
|                                      |                                     | groß / hoch     | $\geq 0 \rightarrow$ endergonisch              | erzwingbar           |                                  |
| > 0<br>endotherm                     | > 0<br>Zunahme                      | egal            | $\geq 0 \rightarrow$ endergonisch              | erzwingbar           |                                  |
|                                      | < 0<br>Abnahme                      | klein / niedrig | $\geq 0 \rightarrow$ endergonisch              | erzwingbar           |                                  |
|                                      |                                     | groß / hoch     | $\leq 0 \rightarrow$ exergonisch               | spontan / freiwillig |                                  |

**SCHOPENHAUERS Entropie-Gesetz:**

Wenn man einen Teelöffel Wein in eine Faß Jauche gießt,  
ist das Resultat Jauche.

Wenn man einen Teelöffel Jauche in ein Faß Wein gießt,  
ist das Resultat ebenfalls Jauche.

alternative Formulierungen der thermodynamischen Hauptsätze:

| HS | Formulierung                                                                                                                         |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0. | Stehen zwei Systeme jeweils mit einem dritten im thermodynamischen Gleichgewicht, so stehen sie auch untereinander im Gleichgewicht. |
| 1. | Die Energie eines abgeschlossenen Systems ist konstant.                                                                              |
| 2. | Thermische Energie ist nicht in beliebigem Maße in andere Energiearten umwandelbar.                                                  |
| 3. | Der absolute Nullpunkt der Temperatur ist unerreichbar.                                                                              |

Q: de.wikipedia.org

| HS | Formulierung                                   |
|----|------------------------------------------------|
| 0. |                                                |
| 1. | Der Energieinhalt der Welt ist konstant.       |
| 2. | Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu. |
| 3. |                                                |

Q: Rudolf CLAUSIUS

| HS | Formulierung                                                                                           |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0. |                                                                                                        |
| 1. | Die verrichtete Arbeit ist gleich der Differenz aus der zugeführten und der abgegebenen Wärme-Energie. |
| 2. |                                                                                                        |
| 3. |                                                                                                        |

Q:

| HS | Formulierung                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0. |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1. |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 2. | $\eta = \frac{W}{Q_{zu}} = \frac{Q_{zu} - Q_{ab}}{Q_{zu}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ <p>Energie lässt sich nur teilweise in Nicht-Wärme-Energie umwandeln. Es entsteht immer Abwärme bei der Umwandlung. Der Nutzungsgrad <math>\eta</math> einer Wärme-Maschine ist immer kleiner 1.</p> |
| 3. |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

Q:

| HS | Formulierung                                                                                                              |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0. |                                                                                                                           |
| 1. | Es kann kein Perpetuum mobile (1. Art) geben, dass mehr Energie bereitstellt als ihm (insgesamt) Energie zugeführt wurde. |
| 2. |                                                                                                                           |
| 3. |                                                                                                                           |

Q:

### interessante Links:

zum Thema und Begriff "Energie": (Prof. LESCH in der Sendung "alpha-Centauri" (BR  $\alpha$ ))

<http://www.br-online.de/br-alpha/alpha-centauri/alpha-centauri-energie-2002-ID1208353667920.xml>

---

Aufgaben (Wiederholung, Übung, Vorbereitung auf Klausur):

- 1.
2. Erstellen Sie ein MindMap zum Thema "chemische Reaktion aus energetischer Sicht"!
- 3.
4. Ethin wird z.B. für Schweiß-Zwecke in einem Druck-Behälter hergestellt. Dieser wird mit etwas Calciumcarbid und Wasser befüllt und verschlossen. Nebenprodukt ist Calciumhydroxid.
  - a) Stellen Sie die Reaktionsgleichung für den Vorgang auf!
  - b) Berechnen Sie die notwendige Masse des Calciumcarbid's, wenn man vom Ethin 35 l (unter Standard-Bedingungen) herstellen möchte!
  - c) Berechnen Sie die Energiemenge, die bei der vollständigen Oxidation / Verbrennung der 35 l Ethin freigesetzt werden!
  - d) Welches Volumen Wasser kann mit der freigesetzten Energie von 15 auf 45 °C erwärmt werden?
  - e) Berechnen Sie für die vollständige Verbrennung des Ethin's (35 l) die molare Reaktionsenthalpie und die molare Volumen-Arbeit!
  - f) Erläutern Sie am Beispiel der vollständigen Verbrennung des Ethin's den 1. Hauptsatz der Thermodynamik!
- 5.
6. Um großtechnisch Methan herzustellen, kann man Kohlenstoff mit Wasserstoff reagieren lassen.
  - a) Stellen Sie die chemische Gleichung für den Vorgang auf!
  - b) Prüfen Sie, ob es sich wirklich um eine chemische Reaktion handelt!
  - c) Berechnen Sie die freie Standard-Enthalpie! (→ -51 kJ)
  - d) Berechnen Sie die freie Enthalpie für den Fall, dass die Reaktion bei 1'000 K geführt wird! (→ 7 kJ)
  - e) Ermitteln Sie, ab welcher Temperatur in °C und K die Reaktion endergonisch abläuft! (→ 915 K; 642 °C)
- 7.
8. Berechnen Sie die Lösungs-Enthalpie von Kaliumchlorid und entscheiden Sie, ob der Lösungs-Vorgang endotherm oder exotherm abläuft!
- 9.
10. Kohlenmonoxid und Wasserstoff sind Grundchemikalien der technischen Chemie. Sie lassen sich durch Überleiten von Wasser(-Dampf) über glühende Kohlen herstellen.
  - a) Geben Sie die Reaktions-Gleichung an!
  - b) Berechnen Sie die freie Standard-Enthalpie! (→ 91 kJ)
  - c) Berechnen Sie die freie Enthalpie für den Fall, dass die Reaktion bei 1'000 K geführt wird! (→ -3 kJ)
  - d) Bei welcher Temperatur erfolgt ein Umschlag zwischen endergonisch und exergonisch? (→ 978 K)
- 11.

---

**Aufgaben für die gehobene Anspruchsebene:**

12. MAXWELL ersann folgendes Modell, das im Widerspruch zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik steht. In einem geteilten Raum befindet sich in der Trennwand ein Fenster, das von einem Dämon betätigt wird. Immer wenn ein schnelles Teilchen ankommt, öffnet er das Fenster und lässt das Teilchen auf die andere Seite. Ähnlich, aber mit den langsamen Teilchen verfährt er, wenn sie von der anderen Seite kommen. Somit sammeln sich auf der einen Seite die langsamen Teilchen und auf der anderen die schnelleren. Thermodynamisch gesehen steigt die Temperatur auf der einen Seite. Wo liegt der Fehler im MAXWELLSchen Dämonen-Modell? Begründen Sie Ihre Meinung!
13. Erstellen Sie ein ConceptMap mit Hilfe eines Computer-Programms (z.B.: CmapTools) zu den Eckthemen "chemische Reaktion" und "Energie"!

## Formeln und Kennwerte der Thermodynamik (Auszug aus dem Tafelwerk)

|                      | Temperatur<br>T [K] | Druck<br>p [kPa] |  |  | mol. Volumen<br>V <sub>M</sub> [l / mol] |
|----------------------|---------------------|------------------|--|--|------------------------------------------|
| Standard-Bedingungen | 298                 | 101,3            |  |  | 24,2                                     |
| Norm-Bedingungen     | 273                 | 101,3            |  |  | 22,4                                     |

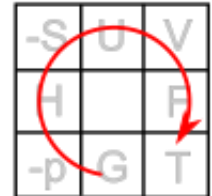
| Stoff                        |                                       |         | mol. Standard-<br>Bildungsenthalpie | mol. Standard-<br>Entropie |
|------------------------------|---------------------------------------|---------|-------------------------------------|----------------------------|
| Name                         | Formel                                | Zustand | $\Delta_B H_m^0$ [kJ / mol]         | $S_m^0$ [J / K mol]        |
| Aluminiumoxid                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | s       |                                     |                            |
| Aluminiumchlorid             | AlCl <sub>3</sub>                     | s       |                                     |                            |
|                              |                                       |         |                                     |                            |
| Benzen (Benzol)              | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>         | l       |                                     |                            |
|                              |                                       |         |                                     |                            |
| Calciumhydroxid              | Ca(OH) <sub>2</sub>                   | s       |                                     |                            |
| Chlorwasserstoff             | HCl                                   | g       | -92                                 | 187                        |
| Cobalt(II)-chlorid           | CoCl <sub>2</sub>                     | s       | -313                                | 109                        |
| Cobalt(II)-chloridhexahydrat | CoCl <sub>2</sub> ·6 H <sub>2</sub> O | s       | -2115                               | 343                        |
|                              |                                       |         |                                     |                            |
|                              |                                       |         |                                     |                            |
|                              |                                       |         |                                     |                            |
|                              |                                       |         |                                     |                            |
| Phosgen                      | COCl <sub>2</sub>                     | l       |                                     |                            |
|                              |                                       |         |                                     |                            |
| Schwefeldioxid               | SO <sub>2</sub>                       | g       | -297                                | 248                        |
|                              |                                       |         |                                     |                            |
| Thionylchlorid               | SOCl <sub>2</sub>                     | l       | -206                                | 216                        |
|                              |                                       |         |                                     |                            |



GUGGENHEIM (1901 - 1970) beschäftigte sich intensiv mit der Thermodynamik und veröffentlichte ein weit anerkanntes Lehrbuch. Von ihm stammt ein Hilfsschema zu den Beziehungen von thermodynamischen Größen. Im GUGGENHEIM-Quadrat (GUGGENHEIM-Schema) sind die

wichtigsten thermodynamischen Größen zusammengestellt. Zum leichten Merken des Schema's gibt es verschiedene Eselsbrücken. Eine davon ist z.B.:

|                            |                             |                           |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| <b>-S</b><br>neg. Entropie | <b>U</b><br>innere Energie  | <b>V</b><br>Volumen       |
| <b>H</b><br>Enthalpie      |                             | <b>F</b><br>freie Energie |
| <b>-p</b><br>neg. Druck    | <b>G</b><br>freie Enthalpie | <b>T</b><br>Temperatur    |



**Gute Physiker haben stets eine Vorliebe für Thermodynamik.**

Aus dem GUGGENHEIM-Quadrat lassen sich die Zusammenhänge zwischen den Größen ableiten. Nehmen wir z.B. die innere Energie U. Sie ist von den Größen abhängig, die in den gegenüberliegenden Ecken des Quadrates stehen:

$$?: \quad dU = -p \cdot dV + T \cdot dS$$

Die fehlenden Differentiale leiten sich von den diagonal entgegengesetzten Größen ab. Beim Druck ist dies das Volumen V und bei der Temperatur die Entropie. Somit ergibt sich:

$$?: \quad dU = -p \cdot dV + T \cdot dS$$

Da die Entropie S im Differential steht, wird das Vorzeichen gestrichen.

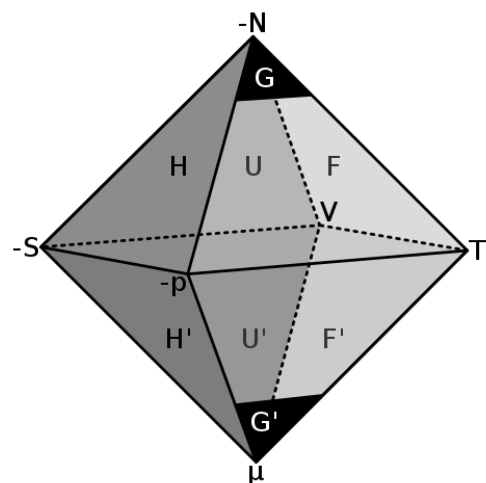
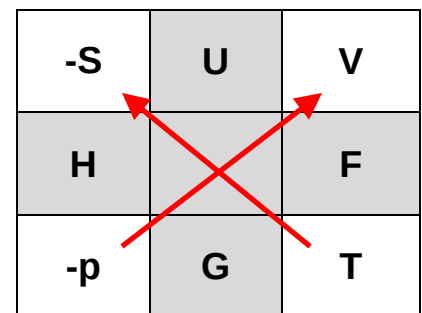
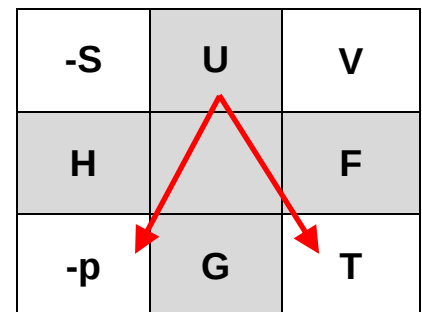
$$?: \quad dU = -p \cdot dV + T \cdot dS$$

Die so erhaltene Differential-Gleichung wird noch um den Ausdruck  $\mu \cdot N$  (Produkt aus chemischen Potential und der Teilchenanzahl N) erweitert. Das Endergebnis lautet dann:

$$dU = -p \cdot dV + T \cdot dS + \mu \cdot dN$$

Das GUGGENHEIM-Schema lässt sich als Basis für die sogenannten MAXWELL-Relationen nutzen. Hierbei kommen dann partielle Differentiale zum Tragen.

Das Thermodynamische Oktaeder betrachtet drei Freiheits-Grade. Die thermodynamischen Potentiale sind dann in den Flächen der Figur zu finden.



Thermodynamisches Oktaeder  
Q: de.wikipedia.org (Joël Gubler)

### 5.2.3. Katalyse



In der chemischen Industrie lassen sich viele Produktionen kaum unter normalen Bedingungen realisieren. Vielfach ist der notwendige Druck oder die Temperatur (für die notwendige Aktivierungs-Energie) technisch nur schwer zu realisieren. So bräuchte man z.B. für die Ammoniak-Synthese:

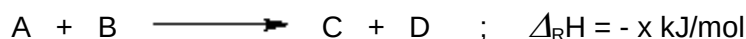
einen Druck von  $10^8$  bar bei einer Arbeits-Temperatur von  $500^\circ\text{C}$ . Das wäre eine riesige technische Herausforderung.

In der Ammoniak-Synthese, wie auch in vielen – wahrscheinlich den meisten – Produktionen setzt man deshalb auf sogenannte Katalysatoren. Auch vom Auto kennt man den Katalysator zu mindestens vom Begriff her.

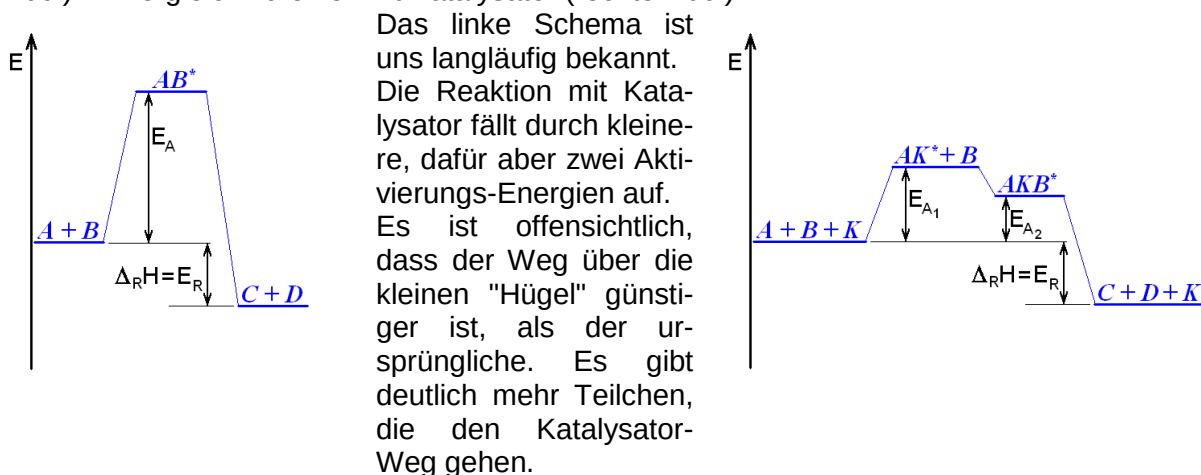
Aber was macht nun ein Katalysator? Die schnelle Antwort ist: "Er setzt die Aktivierungs-Energie herunter." Dadurch haben mehr Teilchen die notwendige Energie für eine Reaktion ( $\rightarrow$ ). Aber wie soll das gehen? Das riecht nach einem Verstoß gegen die Energie-Erhaltung und die thermodynamischen Hauptsätze, die wir uns so schwer erarbeitet haben.

Natürlich haben wir hier keinen Verstoß oder gar ein mögliches Perpetuum mobile vorliegen. Vielmehr ist die obige Schnell-Antwort nicht die vollständige Wahrheit. Katalysatoren gehen mit den Ausgangsstoffen einen anderen – energetisch günstigeren – Weg. Dieser Weg beinhaltet kleinere Aktivierungs-Energien, als die nackte Reaktion. Ist der Katalysator anwesend, dann können die Teilchen den energetisch günstigeren Weg einschlagen. Trotzdem – und das ist wesentlich – bleibt die Reaktions-Energie dabei gleich. Eine exotherme Reaktion mit  $100\text{ kJ/mol}$  bleibt immer eine solche Reaktion, egal, ob sie mit oder ohne Katalysator abläuft. Dies entspricht ja auch ganz dem Satz von HESS.

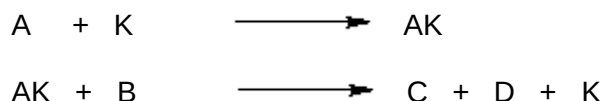
In einer allgemeinen Betrachtung wollen wir die Reaktion:



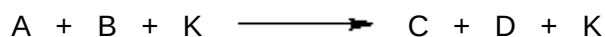
verwenden. Betrachten wir dabei den energetischen Verlauf der "normalen" Reaktion (linke Abb.) im Vergleich zu einer mit Katalysator (rechte Abb.).



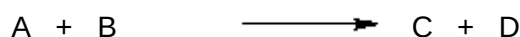
Damit ergeben sich auch geänderte Reaktionen:



Zusammengefasst wäre das:



was wiederum, wegen des Verbot's gleicher Stoffe auf beiden Gleichungs-Seiten genau unsere "Normal"-Gleichung ergibt.



Die Reaktion hat sich also praktisch nicht geändert, nur der Weg ist anders. Dadurch, dass nun viel mehr Teilchen reagieren können erhöht sich die Reaktions-Geschwindigkeit. Aber Achtung, es wird nicht die Geschwindigkeit der ursprünglichen Reaktion verändert, sondern der neue Weg ist schneller!

Recht praktisch ist, dass der Katalysator nach der Reaktion unverändert vorliegt. Er kann also immer wieder benutzt werden.

In der industriellen Praxis stimmt das aber nicht 100 %ig. Durch Nebenprodukte, Verunreinigungen in den Ausgangsstoffen und Alterungs-Prozessen ist die Lebensdauer eines Kontaktes – so wird der Katalysator hier genannt – praktisch begrenzt. Man spricht von einer Vergiftung des Katalysator's / Kontaktes. Die mögliche Nutzungsdauer von Katalysatoren ist aber immer recht groß.

### **Definition(en): Katalyse**

Eine chemische Reaktion, deren Verlauf mit einem Katalysator beeinflusst wird heißt Katalyse.

Katalysen sind chemische Reaktionen, bei denen der Reaktionsweg durch einen zusätzlichen Stoff – den Katalysator – verändert wurde.

### **Definition(en): Katalysator (i.w.S.)**

Katalysatoren sind Stoffe, welche die Reaktions-Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion verändern und nach der Reaktion wieder unverbraucht vorliegen.

Im Allgemeinen meint man bei der Bezeichnung Katalysator einen Stoff, der eine Reaktion befördert. Sachlich kann ein Katalysator aber auch eine Reaktion verlangsamen. In diesem Fall spricht man Hemmstoffen oder Inhibitoren. Inhibitoren werden z.B. dazu eingesetzt, um Reaktion zu verhindern. Das könnte z.B. eine Selbstzersetzung sein.

Beschleunigende Katalysatoren werden als Aktivatoren bezeichnet. Man spricht auch vom Katalysator im engeren Sinn.

Die Gesamtheit aller Katalysatoren sind dann die Katalysatoren im weiteren Sinn.

Die Suche nach einem geeigneten Katalysator ist ein aufwändiger Such-Prozess. Oft sind ganz spezielle Kombinationen von Metallen und / oder Metalloxiden notwendig. Chemiker suchen u.U. ihr ganzes Arbeitsleben vergebens nach einem geeigneten Praxis-geeigneten Stoff.

|                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Definition(en): Katalysator (i.e.S.) / Aktivator</b>                                                                                                                                           |
| Katalysatoren (im üblichen Sprachgebrauch) / Aktivatoren sind Stoffe, welche die Reaktions-Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion erhöhen und nach der Reaktion wieder unverbraucht vorliegen. |
| Aktivatoren sind Katalysatoren, welche die Reaktions-Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion erhöhen.                                                                                           |

|                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Definition(en): Hemmstoff / Inhibitor</b>                                                                                                       |
| Hemmstoffe sind Stoffe, welche die Reaktions-Geschwindigkeit (einer Ziel-Reaktion) verringern und nach der Reaktion wieder unverbraucht vorliegen. |
| Hemmstoffe sind Katalysatoren, welche die Reaktions-Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion verringern.                                          |

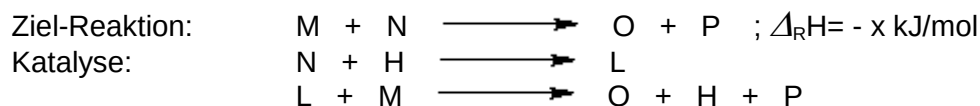
#### **katalysierte Reaktionen von Kohlenmonoxid und Wasserstoff**

| <b>Katalysator</b>            | <b>(weitere)<br/>Reaktions-Bedingungen</b> | <b>Produkte</b>            |
|-------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|
| Cu- od. Zn-Cr-Katalysator     | 300 – 400 atm                              | Ethanol                    |
| Cu- od. Zn-Cr-Katalysator     | 300 – 400 atm; Alkali-Ionen                | höhere Alkohole            |
| Ni-Katalysator                | 250 °C                                     | Ethansäure                 |
| Ni-Katalysator                | 250 °C; Normal-Druck                       | Methan                     |
| Fe-, Ni-, Co-Katalysatoren    | 10 – 20 atm                                | Benzin (Parafine, Olefine) |
| Ru-Katalysator                | 150 atm                                    | feste Parafine             |
| Al-Th- bzw. Zn-Th-Katalysator | 300 atm                                    | iso-Parafine               |

#### **Aufgaben:**

**1. Erstellen Sie eine Gedankenkarte (Mind-Map od. ) zum Thema Katalyse!**

**2. Gegeben ist der folgende Ablauf einer Katalyse:**



**Skizzieren Sie das Energie-Niveau-Schema für den Fall, dass der Katalysator ein Hemmstoff ist! Diskutieren Sie die ev. unterschiedlichen Vorschläge Ihrer Lern-Gruppe!**

**3. Analysieren Sie die Tabelle der katalysierten Reaktionen von Kohlenmonoxid und Wasserstoff! Warum bestimmt der Katalysator so entscheidend über die Reaktions-Produkte mit? Geben Sie eine vollständige Erklärung!**

### 5.2.3.1. homogene Katalysen



#### **Definition(en): homogene Katalyse**

Liegen Katalysator und Edukte in der gleichen Phase vor, dann spricht man von einer homogenen Katalyse.

| Reaktionen                                                                       | gebräuchliche Katalysatoren                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Oxidationen</b>                                                               | V, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Ag, Cu, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnO <sub>2</sub> , Ag <sub>2</sub> O, CuO                                                                                   |
| <b>Hydrierungen</b><br><b>Dehydrierungen</b>                                     | Pt, Pd, Ni, Co, Fe, Cu, auch deren Oxide<br>RANEY-Metalle, versch. Oxide von Cr, Zn, V, W, Mo<br>z.T. auf Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> od. anderen Tonerden                                           |
| <b>Hydratisierungen</b><br><b>Dehydratisierungen</b>                             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , dotiertes SiO <sub>2</sub> , Hydroxide, Phosphate, TiO <sub>2</sub> , BeO, ZrO <sub>2</sub> , ZnO, Alumosilikate, Misch-Oxide                                          |
| <b>Isomerisierungen</b>                                                          | Cu, Ni, Hydroxide, Oxide von Al, Mo, Mg, Ca, Ba                                                                                                                                                         |
| <b>Halogenierungen</b>                                                           | Fe-, Cu- u. Al-Halogenide, Phosphorhalogenide, Iod                                                                                                                                                      |
| <b>Kondensationen</b>                                                            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ThO <sub>2</sub> , WO <sub>3</sub> , Tonerden, CuSO <sub>4</sub> , AlCl <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , MgCl <sub>2</sub> , BF <sub>3</sub> -Alkalien |
| <b>Cracken,</b><br>Spaltung C-C und C-H bis C, H <sub>2</sub> u. CH <sub>4</sub> | Pt, Ni, Cu                                                                                                                                                                                              |
| <b>Cracken,</b><br>Zerfalls- u. Kondensations-Produkte                           | AlCl <sub>3</sub> , FeCl <sub>3</sub> , ZnCl <sub>2</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Kohle, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                      |
| <b>Cracken,</b><br>Spaltung zu niederen Olefinen und Paraffinen                  | Oxide u. Sulfide von Mo u. V                                                                                                                                                                            |
| <b>Polymersationen</b>                                                           | Al- u. Ti-Halogenide, Cr-Oxide                                                                                                                                                                          |

Q: /23, S. 160/

---

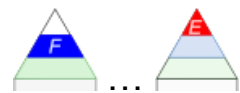
### 5.2.3.2. heterogene Katalysen



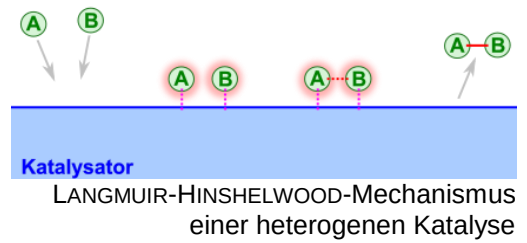
#### **Mechanismus heterogener Katalysen**

- **Andiffusion**      der Ausgangsstoffe aus dem Umgebungsmedium an die Oberfläche des Katalysators (Zuwanderung)
- **Adsorption**      aktive Anlagerung eines od. mehrerer Ausgangsstoffe an den Katalysator (Anhaftung)
- **Umsatz**            der Ausgangsstoffe zu Reaktionsprodukten (chemische Reaktion) in der Adsorptions-Schicht
- **Desorption**        der Reaktionsprodukte von der Katalysator-Oberfläche (Ablösung)
- **Abdiffusion**        der Reaktionsprodukte in das Umgebungsmedium (Abwanderung)

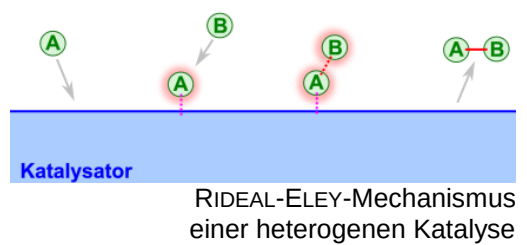
|                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Definition(en): heterogene Katalyse</b>                                                                                          |
| Liegen Katalysator und Edukte in der verschiedenen Phasen / Aggregatzuständen vor, dann spricht man von einer heterogenen Katalyse. |
|                                                                                                                                     |



## LANGMUIR-HINSHELWOOD-Mechanismus



## RIDEAL-ELEY-Mechanismus



### 5.2.3.3. Autokatalyse

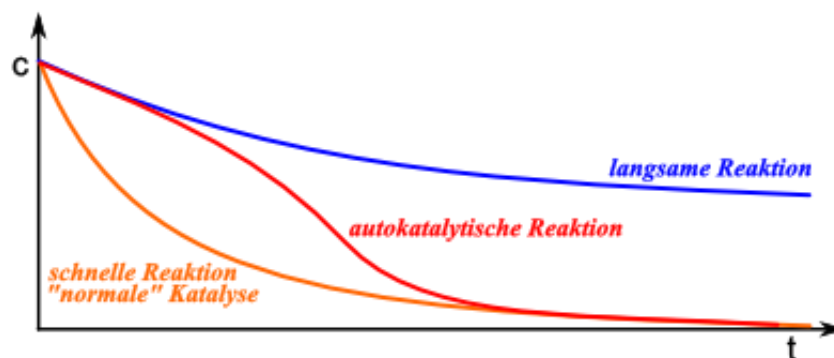
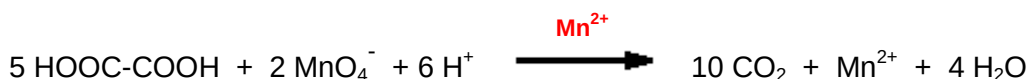
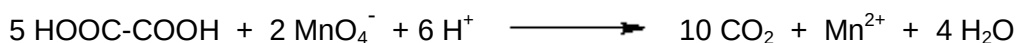
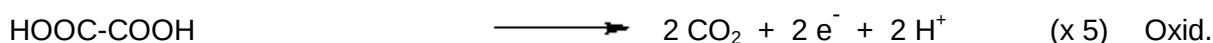


während der Reaktion bildet sich ein Stoff (Zwischen- oder Reaktions-Produkt), welcher katalytisch auf einer der (vorlaufenden) Reaktions-Schritte wirkt:

der Verlauf der Konzentrations-Veränderung ist eine Mischung aus der "normalen" - langsamen Reaktion und der gleichen Reaktion mit einem klassischen Katalysator. Hier verläuft die Reaktion schneller bzw. das Gleichgewicht stellt sich schneller ein.

Die Konzentrations-Kurve einer Autokatalyse folgt zuerst der normalen Reaktion. Es ist noch kein selbst-gebildeter Katalysator vorhanden. Nach und nach steigt dessen Konzentration und damit auch der Katalysator-Effekt. Nun wird die Reaktion immer schneller. Letztendlich nähert sich die Konzentration dem Graphen, den man mit einem "normalen" Katalysator erreicht hätte.

Beispiel: Reaktion von Oxalsäure mit Kaliumpermanganat (Oxidation von Oxalsäure)



Bei dieser Reaktion ist auch ein niedriger pH-Wert förderlich für eine höhere Reaktions-Geschwindigkeit. In einer basischen Lösung fehlen die notwendigen Protonen (Hydronium-Ionen) für die Reduktion des Manganat's.



### 5.2.3.4. Bio-Katalysen – Enzyme als Katalysatoren



Die effektivsten Katalysatoren haben aber nicht wir Menschen geschaffen, sondern die Natur. Die Lebewesen sind mit ihren zellulären Stoffwechseln quasi die Könige der Katalyse. In jeder Zelle beeinflussen Tausende von Bio-Katalysatoren die Umwandlungs-Prozesse von Stoffen. Die Katalysatoren der Zelle heißen Enzyme und gehören zur Stoffklasse der Proteine. Die besondere Leistung liegt zum Einen in der Winzigkeit der Vorgänge, als auch in dem Vermögen, die chemischen Reaktionen allesamt bei normalen Lebens- bzw. Zell-Bedingungen durchführen zu können.

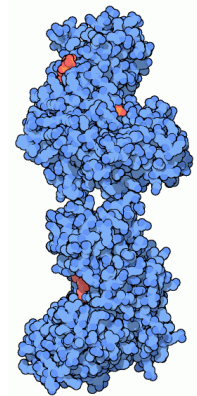
Man stelle sich nur mal vor die Zellatmung – also die vollständige Verbrennung von Glucose – würde wie üblich ablaufen. Da müssten hohe Temperaturen zu Aktivierung aufgebracht und dann die großen freiwerdenden Energien sinnvoll umgesetzt werden. Beim zellulären Stoffwechsel liegt das Geheimnis im abgewandelten Reaktions-Weg.

Viele kleine Reaktions-Schritte ersetzen die direkte Reaktion. Man nennt die Gesamtheit der Reaktionen dann Metabolismus. Jeder einzelne Schritt wird von einem Enzym durchgeführt. Dabei wird die Gesamt-Reaktions-Energie in kleineren Portionen frei. Meist sind diese so groß, dass ATP als universeller Energie-Träger der Zelle dabei gebildet werden kann.

Aus wissenschaftlicher Sicht handelt es sich bei Enzym-Reaktionen um mikro-heterogene Katalysen.

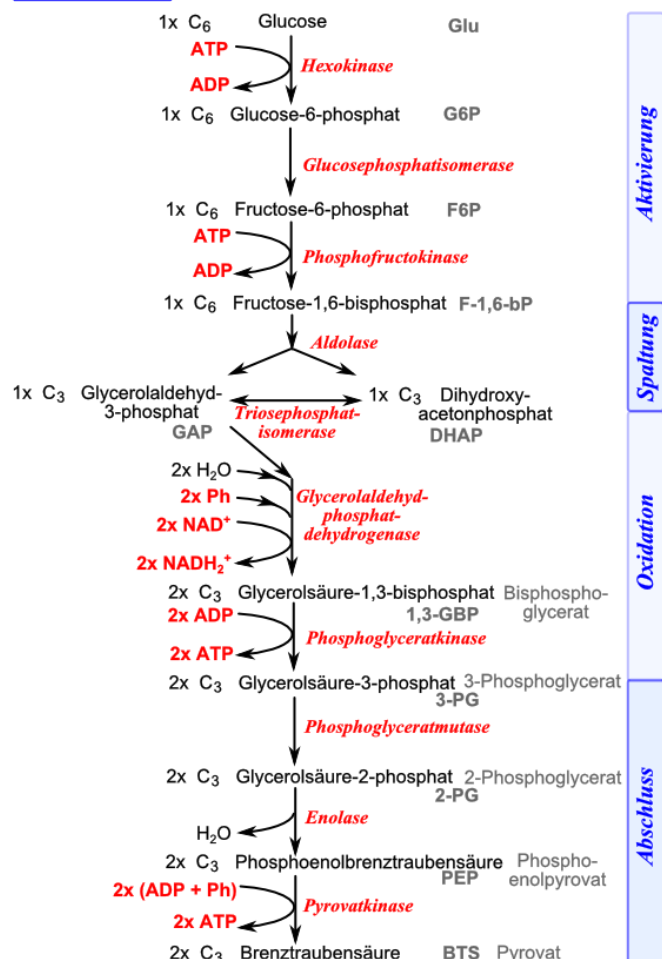
Im Skript **Stoff- und Energie-wechsel** gehen wir ausführlicher auf die genauen Abläufe ein.

Bei der Systematisierung der Enzyme hat sich die folgende Klassifizierung international durchgesetzt.



Enzym (blau)  
mit Substraten (rot)

#### Glycolyse



erster Teil der energetischen Verwertung  
von Glucose in Zellen

| Enzym-Klasse                                  | Reaktions-Spektrum                                                                                                                                                                                                                                           | Beispiele, ... |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>1. Oxireduktasen<br/>(Oxidoreduktasen)</b> | Übertragung von H ...<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• direkt auf O (→ Oxidasen)</li> <li>• auf org. Akzeptoren (→ Dehydrogenasen)</li> </ul> (Übertragung von Elektronen)                                                                        |                |
| <b>2. Transferasen</b>                        | Übertragung von Molekül-Gruppen<br>z.B.:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• -CH<sub>3</sub> (→ Methyltransferasen)</li> <li>• -H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (→ Phosphotransferasen)</li> <li>• -NH<sub>2</sub> (Aminotransferasen)</li> </ul>        |                |
| <b>3. Hydrolasen</b>                          | hydrolytische Spaltung von ...<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• C–O-Bindungen (→ Glycosidhydrolasen; Ester(hydro)lasen)</li> <li>• C–N-Bindungen (→ Peptidhydrolasen)</li> </ul>                                                                  |                |
| <b>4. Lyasen</b>                              | Spaltung von ...<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• C–C-Bindungen (→ )</li> <li>• C–N-Bindungen (→ )</li> <li>• C–O-Bindungen (→ )</li> <li>• C–S-Bindungen (→ )</li> <li>• C–Halogen-Bindungen (→ )</li> </ul>                                     |                |
| <b>5. Isomerasen</b>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Überführung optisch aktiver Substrate in Racemate (→ Racemerasen)</li> <li>• cis-trans-Umlagerungen (→ cis-trans-Isomerasen)</li> <li>• Umlagerungen an der CO-Gruppe von Monosacchariden (→ Epimerasen)</li> </ul> |                |
| <b>6. Ligasen (Synthetasen)</b>               | Knüpfen neuer Bindungen                                                                                                                                                                                                                                      |                |

---

**Definition(en): Bio-Katalyse**

Bio-Katalysen sind solche chemischen Reaktionen, die unter Anwesenheit von Enzymen – zumeist in (biologischen) Zellen – ablaufen.

**Definition(en): Bio-Katalysatoren = Enzyme**

Enzyme sind katalytisch wirkende Proteine. Sie ermöglichen die Durchführung von bestimmten chemischen Reaktionen / Abläufen und normalen Zell-Bedingungen (Körpertemperatur bzw. Temperaturen zwischen üblicherweise 0 bis 50 °C; wässriges Milieu; pH-Wert neutral bis sauer, selten basisch; kleine Energie-Portionen (z.B. ATP)).

Biokatalysen vorrangig von den folgenden Faktoren abhängig:

- Temperatur
- pH-Wert
- Substrat-Konzentration
- Enzym-Konzentration
- Aktivatoren, Inhibitoren (Hemmstoffe), Gifte, Medikamente, ...
- Strahlung



Dieses Spiel kann ev. besser erst nach der Besprechung der Grundlagen der Kinetik durchgeführt werden!  
Es ist aber an dieser Stelle wegen der inhaltlichen Passung aufgeführt.

### Aufgaben (zum Experiment / Spiel):

**1. Lesen Sie sich die Beschreibung des Spiel's (Modell-Experiment's) durch!**

Modell-Reaktion:  $A \xrightarrow{\quad} Z \xrightarrow{\quad} B$

**2. Wie wird aus Ihrer Sicht ein abgeleitetes Diagramm aussehen, in dem für die Spielzüge (Takte) die Anzahlen der Erbsen A, B und Z dargestellt werden?**

**3. Skizzieren Sie ein passendes Diagramm und begründen Sie die vermutete Kurven-Form! (Sollten mehrere Möglichkeiten bestehen (z.B. Schwankungen od.ä.), dann kennzeichnen Sie das in der Skizze durch mehrere dünnere Kurven oder einen schattierten Bereich.)**

**4. Führen Sie das Modell-Experiment / Spiel einmal durch!**

**5. Erstellen Sie ein passendes Diagramm auf Millimeter-Papier!**

**6. Erklären Sie den Verlauf Ihrer Kurve!**

**7. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit denen anderer Kurs-Teilnehmer / Team's!**

### **Modell-Experiment / Spiel: Erbsen (Kaskade)**

Benötigt werden:

- 50 gelbe Erbsen  $\rightarrow$  A; 50 grüne Erbsen  $\rightarrow$  B; 50 rote (/ gefärbte) Erbsen
- (alternativ: unterschiedlich gefärbte Kugeln, Bohnen gleicher Größe)
- hoher undurchsichtiger Becher oder Becherglas mit Papier-Umrandung (als Sichtschutz) oder ähnliches als (Stochastik-) "Urne"
- Würfel

**Ablauf:**

1. Befüllen der Urne mit den gelben Erbsen
2. Festlegen der Anzahl der Ziehungen (Spielzüge) (z.B. 50 (besser 100))  $\rightarrow$  Takte
3. Festlegen des minimalen Punktwertes auf dem Würfel (z.B. 2)  $\rightarrow$  Zielwert für Übergang gelb nach rot
4. Festlegen des minimalen Punktwertes auf dem Würfel (z.B. 3)  $\rightarrow$  Zielwert für Übergang rot nach grün
5. Ziehen einer Erbse aus der Urne
6. WENN die Erbse grün ist, DANN weiter bei 7.
  - a. bei Erbse gelb: einmal Würfel; SONST weiter bei 6c.
  - b. WENN Würfelwert größer od. gleich ist wie der festgelegte Zielwert, DANN Austausch der gelben Erbse durch eine rote; weiter bei 7.
  - c. bei Erbse rot: einmal Würfel; SONST weiter bei 7.
  - d. WENN Würfelwert größer od. gleich ist wie der festgelegte Zielwert, DANN Austausch der roten Erbse durch eine grüne
7. ev. Veränderung und neue Anzahlen (für jede Ziehung (jeden Spielzug, Takt)) notieren
8. weiter bei 5. bis Anzahl gewünschte Ziehungen erreicht ist

Hinweis: Ev. kann bei 6b auf das "weiter mit 7." verzichtet werden und gleich bei 6c weitergemacht werden!

Alternativ kann die Anzahl der Spielzüge (auch im Vergleich zu weiteren noch folgenden Spielen) erhöht / verdoppelt werden.

8. Setzen Sie das Modell-Experiment in eine Tabellenkalkulation um (siehe z.B. Abb.) und lassen Sie sich ein passendes Diagramm erstellen!

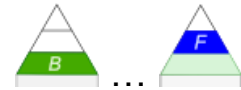
Ausschnitt (Anfang) einer stochastischen Simulation  
mit einer Tabellenkalkulation

Ausschnitt (Anfang) einer deterministischen Simulation mit einer Tabellenkalkulation

---

## 5.3. die Kinetik chemischer Reaktionen

### 5.3.1. einfache Kinetik chemischer Reaktionen



offensichtlich gibt es verschieden schnelle chemische Reaktionen

als Einteilungs-Kriterium wird die Halbwertszeit  $\tau_{1/2}$  benutzt (Erklärung zu der Größe folgt!)

sehr schnell sind ( $\tau_{1/2} \approx 0,000.000.000.1 - 1$  s):

- Detonationen (Sprengstoff-Reaktionen)
- Fällungs-Reaktionen ( $\tau_{1/2} \approx 0,000.1$  s)
- Neutralisationen ( $\tau_{1/2} \approx 0,000.000.1 - 0,000.000.000.1$  s)
- Bildung von Wasserstoff-Brücken

schnelle Reaktionen sind ( $\tau_{1/2} \approx 1$  s – 1 min):

- biochemische Reaktionen ( $\tau_{1/2} \approx 1$  s)
- Redox-Reaktionen

als mäßig schnell betrachtet man ( $\tau_{1/2} \approx 1 - 100$  min):

- technische Reaktionen (mit Katalysatoren und unter speziellen Bedingungen) ( $\tau_{1/2} \approx 0,01 - 1$  min)

mäßig langsam laufen z.B. ab ( $\tau_{1/2} \approx 1 - 100$  h):

- Hydrolyse von Fetten und Estern ( $\tau_{1/2} \approx 1$  h)
- 

langsam laufen z.B. ab ( $\tau_{1/2} \approx 1 - 100$  d):

- Verderb von Lebensmitteln

sehr langsam laufen z.B. ab ( $\tau_{1/2} \approx 1 - 1.000$  a):

- Korrosion / Rosten von Metallen
- 

extrem langsam ( $\tau_{1/2} \approx 10.000 - 1.000.000$  a):

- geochemische Vorgänge (laufen in 10.000 bis 1.000.000 Jahren ab)

gewissermaßen gar nicht reagieren ( $\tau_{1/2} \approx 1.000.000 - 1.000.000.000$  a):

- Wasserstoff und Iod (benötigen ein Zehntel des Alters des Universums)

in einer ersten Vermutung könnte man die thermodynamischen Verhältnisse für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten verantwortlich machen wollen  
wenn der Energie-Gewinn besonders hoch (stark exotherme / stark exergone Reaktion), dann sollte doch die Reaktion besonders intensiv und vielleicht auch schnell ablaufen  
endotherme (endergone) Reaktionen müssten demnach (besonders) langsam ablaufen

dies trifft aber kaum allgemein zu

gegen die These spricht auch, dass Reaktionen unter dem Einfluß von Katalysatoren deutlich schneller oder eben langsamer verlaufen, obwohl der gleiche Energie-Betrag umgesetzt wird (→ Satz von HESS)

es muss scheinbar andere Effekte geben, welche die Reaktions-Geschwindigkeit beeinflussen

dazu gehören:

- die Strukturen der beteiligten Stoffe (sterische Behinderungen an den Reaktions-Orten)
- Energien, die in speziellen Bewegungen enthalten sind (Rotationen, Schwingungen, ...)
- Potential-Felder (COULOMB-Wechselwirkungen, LONDON-Kräfte, ...)
- 

Der Zweig der Chemie, der sich mit den Reaktions-Abläufen und –Geschwindigkeiten beschäftigt, wird Kinetik genannt. Hier ist auch der deutlich Bezug zur Physik mit seinen Abläufen und Bewegungen (einschließlich Geschwindigkeiten) zu erkennen.

| Beschreibung         |  | Reak.-Zeit<br>$t_{1/2}$ |            | Reaktion                                                                                        | Aktivierungs-Energie<br>[kJ/mol] |
|----------------------|--|-------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| metastabile Zustände |  | $10^{10}$               | Jahr(e)    |                                                                                                 |                                  |
|                      |  | $10^8$                  |            | $\text{H}_2 + \text{I}_2 \longrightarrow 2 \text{HI}$                                           |                                  |
|                      |  | $10^6$                  |            |                                                                                                 | 120                              |
| extrem langsam       |  | $10^4$                  |            | geochemische Prozesse                                                                           |                                  |
|                      |  | $10^2$                  |            |                                                                                                 |                                  |
|                      |  | 1                       | Stunde(n)  |                                                                                                 | 80                               |
| langsam              |  |                         |            | $2 \text{Ce}^{4+} + \text{Ti}^+ \longrightarrow 2 \text{Ce}^{3+} + \text{Ti}^{3+}$              |                                  |
|                      |  | 1                       |            | $\text{RCOOCH}_3 + \text{OH}^- \longrightarrow \text{RCOO}^- + \text{CH}_3\text{OH}$            |                                  |
|                      |  |                         |            | technische Abläufe                                                                              |                                  |
|                      |  | 1                       |            | biochemische Reaktionen                                                                         | 40                               |
|                      |  | $10^{-1}$               | Sekunde(n) | Hämoglobin $\rightleftharpoons$ Oxyhämoglobin                                                   |                                  |
| schnell              |  | $10^{-2}$               |            | $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$               |                                  |
|                      |  | $10^{-4}$               |            | $\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$ |                                  |
|                      |  | $10^{-6}$               |            | $\text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow \text{BaSO}_4 \downarrow$                    |                                  |
| extrem schnell       |  | $10^{-8}$               |            | $\text{H}_3\text{C}\cdot + \cdot\text{CH}_3 \longrightarrow \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3$     |                                  |
|                      |  | $10^{-10}$              |            | $\text{H}^+ + \text{OH}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$                                   | 0                                |
|                      |  |                         |            | Molekül-Schwingungen                                                                            |                                  |

Q: /24, S. 70/

### Aufgaben (zum Experiment / Spiel):

1. Lesen Sie sich die Beschreibung des Spiel's (Modell-Experiment's) durch!

Modell-Reaktion: A  $\longrightarrow$  B

2. Wie wird aus Ihrer Sicht ein abgeleitetes Diagramm aussehen, in dem für die Spielzüge (Takte) die Anzahlen der Erbsen A und B dargestellt werden?

3. Skizzieren Sie ein passendes Diagramm und begründen Sie die vermutete Kurven-Form! (Sollten mehrere Möglichkeiten bestehen (z.B. Schwankungen od.ä.), dann kennzeichnen Sie das in der Skizze durch mehrere dünnere Kurven oder einen schattierten Bereich.)

4. Führen Sie das Modell-Experiment / Spiel einmal durch!

5. Erstellen Sie ein passendes Diagramm auf Millimeter-Papier!

6. Erklären Sie den Verlauf Ihrer Kurve!

7. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit denen anderer Kurs-Teilnehmer / Team's!

### **Modell-Experiment / Spiel: Erbsen (Erbsen-Einzel)**

Benötigt werden:

- 50 gelbe Erbsen  $\rightarrow$  A; 50 grüne Erbsen  $\rightarrow$  B
- (alternativ: unterschiedlich gefärbte Kugeln, Bohnen gleicher Größe)
- hoher undurchsichtiger Becher oder Becherglas mit Papier-Umrandung (als Sichtschutz) oder ähnliches als (Stochastik-) "Urne"
- Würfel

Ablauf:

1. Befüllen der Urne mit den gelben Erbsen
2. Festlegen der Anzahl der Ziehungen (Spielzüge) (z.B. 50)  $\rightarrow$  Takte
3. Festlegen des minimalen Punktwertes auf dem Würfel (z.B. 5)  $\rightarrow$  Zielwert
4. Ziehen einer Erbse aus der Urne
5. WENN die Erbse grün ist, DANN weiter bei 6.
  - a. bei Erbse gelb: einmal Würfel
  - b. WENN Würfelwert größer od. gleich ist wie der festgelegte Zielwert, DANN Austausch der gelben Erbse durch eine grüne
6. ev. Veränderung und neue Anzahlen (für jede Ziehung (jeden Spielzug, Takt)) notieren
7. weiter bei 4. bis Anzahl gewünschte Ziehungen erreicht ist

### für die gehobene Anspruchsebene:

8. Setzen Sie das Modell-Experiment in eine Tabellenkalkulation um (siehe z.B. Abb.) und lassen Sie sich ein passendes Diagramm erstellen!

|                                                             | A                                                                                                          | B        | C              | D                 | E      | F              | G | H |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------|-------------------|--------|----------------|---|---|
| <b>Modell-Experiment Erbsen (stochastisch, spielerisch)</b> |                                                                                                            |          |                |                   |        |                |   |   |
| Ablauf                                                      | 1. Erbse zufällig wählen (aus undurchsichtiger Urne)                                                       |          |                |                   |        |                |   |   |
|                                                             | 2. erwürfeln einer Energie                                                                                 |          |                |                   |        |                |   |   |
|                                                             | 3. bewerten der Erbse (richtig (A) und mindestens notw. EA (Aktivierungs-Energie)), dann Austausch gegen B |          |                |                   |        |                |   |   |
|                                                             | Start                                                                                                      |          |                |                   |        | min EA (1-->6) |   |   |
|                                                             | 30                                                                                                         | 0        |                |                   |        | 5              |   |   |
| Takt                                                        | Erbsen A                                                                                                   | Erbsen B | gezogene Erbse | erwürfelte Energ. | Umsatz |                |   |   |
| 0                                                           | 30                                                                                                         | 0        | A              | 4                 | 0      |                |   |   |
| 1                                                           | 30                                                                                                         | 0        | A              | 5                 | 1      |                |   |   |
| 2                                                           | 29                                                                                                         | 1        | A              | 1                 | 0      |                |   |   |
| 3                                                           | 29                                                                                                         | 1        | A              | 5                 | 1      |                |   |   |
| 4                                                           | 28                                                                                                         | 2        | A              | 5                 | 1      |                |   |   |

Ausschnitt (Anfang) einer stochastischen Simulation mit einer Tabellenkalkulation



Wichtig ist es immer, sich zu vergegenwärtigen, dass es sich bei Spielen und Simulationen immer nur um Modelle handelt. Bestimmte Elemente aus der Realität können Teilen des Modell's zugeordnet werden. Viele Aspekte sind aber durch einfache Modelle nicht umsetzbar. Das ist aber meist auch gar nicht gewünscht. Wir wollen ja eine Vereinfachung durch das Modell erreichen.

| chemische Reaktion<br>Praxis | Simulation<br>Modell                                             |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Reaktion A + B               | Erbsen-Tausch gelb gegen grün<br>Tausch A geben B in Kalkulation |
| Reaktions-Zeit               | Anzahl Spielrunden<br>Ziehungen<br>Takt                          |
| Konzentration $c[A]$         | Anzahl der gelben Erbsen pro Urne                                |
| Aktivierungs-Energie         | Würfel-Wert                                                      |
|                              |                                                                  |
| Reaktions-Geschwindigkeit    |                                                                  |
|                              |                                                                  |

### **stochastische Simulationen**

Stochastische Simulationen haben Vor- und Nachteile.

relativ nah an der Realität, denn auch die Teilchen treffen sich zufällig

es werden für die grundlegenden Prozesse Wahrscheinlichkeiten gebraucht, diese sind immer direkt aus der Praxis zu bekommen

durch die begrenzte Anzahl der simulierten Objekte erhält man meist sehr schwankende - zitterige - Diagramme

zeigen manchmal den Verlauf so an, dass Fehldeutungen möglich sind

erst bei einer Vielzahl von Simulationen und dem Mitteln der Ergebnisse erhält man tragfähige Aussagen

stochastische Simulationen müssen also immer mehrfach durchgeführt werden und die Ergebnisse / Verläufe gemittelt werden. Das bedeutet einen relativ hohen Aufwand für die Simulation und Nachbereitung.

Ein entscheidender Vorteil liegt daran, dass die zugrunde liegenden Modelle meist sehr einfach sind und vielfach intuitiv verständlich sind.

### **deterministische Simulationen**

Alternativ kann man nun die Simulation deterministisch – also nach festen Regeln - durchführen. Das ermöglicht es uns auch, gleich deutlich höhere Anzahlen von modellierten Teilchen anzusetzen.

Der Vorteil deterministischer Simulationen liegt vor allem in ihrer Wiederholbarkeit. Jeder Durchlauf wird bei gleichen Start-Bedingungen immer das gleiche Ergebnis produzieren.

Allerdings tauchen – Berechnungs-bedingt – praktisch immer gebrochene Zahlen auf. Diese lassen sich nicht direkt umsetzen. Beachtet man aber die in Wirklichkeit reagierenden Teilchen-Zahlen, dann spielen die Nachkommastellen keine Rolle oder können entsprechend für größere Anzahlen interpretiert werden.

Der Ausschnitt der nebenstehenden Tabellenkalkulation zeigt eine mögliche Umsetzung.

Zuerst wird für die Anzahl der gezogenen Erbsen (hier 10) der statistisch gemittelte Anteil berechnet ("gezogene Erbsen A"). Im nächsten Schritt wird daraus der Anteil berechnet der reagieren kann ("Anteil reag. Erbsen").

Das ermittelte Ergebnis wird dann mit den vorhandenen Erbsen (A und B) verrechnet und damit die Erbsen-Zahlen für den nächsten Simulations-Schritt festgelegt.

Bei deterministischen Simulationen kommen wir meist zu idealisierten Aussagen.

Je nach Formel-Formel-Konstrukt können die Ergebnisse aber gut nachvollzogen werden. Deshalb lassen sich die Daten aus der abgebildeten Kalkulation als Vergleich benutzen. Bei gleichen Ausgangswerten sollte Sie auf die gleichen Zahlen kommen.

für erforschende / erkundende Simulationen nur dann geeignet, wenn die Simulations-Formeln nicht auf dem zu erkundenden Gesetzen beruhen  
ansonsten findet man genau das, was man vorgegeben hat

gut geeignet für Simulationen mit veränderlichen Ausgangs-Bedingungen  
man kann viele unterschiedliche Simulationen durchführen, ohne auf ein Mitteln der Zwischen-Ergebnisse zurückgreifen zu müssen

|    | A                                                             | B                                                                 | C               | D               | E                        | F                          | G |
|----|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|---|
| 1  | <b>Modell-Experiment Erbsen (deterministische Simulation)</b> |                                                                   |                 |                 |                          |                            |   |
| 2  |                                                               |                                                                   |                 |                 |                          |                            |   |
| 3  |                                                               | <b>Ablauf</b> 1. Berechnung "gezogener" Erbsen A (gemittelt)      |                 |                 |                          |                            |   |
| 4  |                                                               | 2. ermitteln der "Reaktions-fähigen" Erbsen A (Anteil, gemittelt) |                 |                 |                          |                            |   |
| 5  |                                                               |                                                                   |                 |                 |                          |                            |   |
| 6  |                                                               |                                                                   |                 |                 |                          |                            |   |
| 7  |                                                               |                                                                   |                 |                 |                          |                            |   |
| 8  |                                                               | Start                                                             |                 | gezogen insg.   | min EA (1-->6)           |                            |   |
| 9  |                                                               | 300                                                               | 0               | 10              | 3                        |                            |   |
| 10 |                                                               |                                                                   |                 |                 |                          |                            |   |
| 11 |                                                               | <b>Takt</b>                                                       | <b>Erbsen A</b> | <b>Erbsen B</b> | <b>gezogene Erbsen A</b> | <b>Anteil reag. Erbsen</b> |   |
| 12 |                                                               | 0                                                                 | 300,0           | 0,0             | 10,00                    | 6,67                       |   |
| 13 |                                                               | 1                                                                 | 293,3           | 6,7             | 9,78                     | 6,52                       |   |
| 14 |                                                               | 2                                                                 | 286,8           | 13,2            | 9,56                     | 6,37                       |   |
| 15 |                                                               | 3                                                                 | 280,4           | 19,6            | 9,35                     | 6,23                       |   |
| 16 |                                                               | 4                                                                 | 274,2           | 25,8            | 9,14                     | 6,09                       |   |
| 17 |                                                               | 5                                                                 | 268,1           | 31,9            | 8,94                     | 5,96                       |   |
| 18 |                                                               | 6                                                                 | 262,2           | 37,8            | 8,74                     | 5,83                       |   |
| 19 |                                                               | 7                                                                 | 256,3           | 43,7            | 8,54                     | 5,70                       |   |
| 20 |                                                               | 8                                                                 | 250,6           | 49,4            | 8,35                     | 5,57                       |   |
| 21 |                                                               | 9                                                                 | 245,1           | 54,9            | 8,17                     | 5,45                       |   |
| 22 |                                                               | 10                                                                | 239,6           | 60,4            | 7,99                     | 5,32                       |   |
| 23 |                                                               | 11                                                                | 234,3           | 65,7            | 7,81                     | 5,21                       |   |

Ausschnitt (Anfang) einer deterministischen Simulation mit einer Tabellenkalkulation

### 5.3.1. die Reaktions-Geschwindigkeit



wie wir bei der Stoß-Theorie schon gesehen haben, ist der Verlauf von chemischen Reaktionen von der Anzahl der verfügbaren Teilchen und deren Verteilung im Raum abhängig als verbindende Größe von Teilchen-Anzahl und Raum hat sich die Konzentration  $c$  eingebürgert

$$c = \frac{n}{V}$$

$c$  .. Konzentration [mol/l]

$n$  .. Stoffmenge [mol] (1 mol =  $6,022 \cdot 10^{23}$  Teilchen)

$V$  .. Volumen [l]

Reaktionsgeschwindigkeit  $RG$  oder  $v$ , wegen Verwechslungsgefahr mit Volumen  $V$  hier mit  $RG$  abgekürzt und als Formelzeichen verwendet

in Anlehnung an die Geschwindigkeit aus der Physik ( $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ , Geschwindigkeit ist der Quotient aus geschafftem Weg innerhalb einer bestimmten Zeit) ist die Reaktionsgeschwindigkeit durch:

$$RG = \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad \text{bei } V = \text{const.}$$

$RG$  .. Reaktionsgeschwindigkeit

$\Delta n$  .. Änderung der Teilchenzahl

$\Delta t$  .. Zeitdifferenz (abgelaufene Zeit, Zeitänderung)

definiert, was in dem Sinne auch einem Schaffen / dem Umsatz an Stoff innerhalb einer bestimmten Zeit entspricht. In älterer Literatur findet man auch die Bezeichnung Reaktionsrate für die Reaktions-Geschwindigkeit.

Die Erfassung der Stoffmenge ist aber eher problematisch.

Alternativ kann man statt der Teilchenzahl auch die Konzentration einsetzen. Dabei darf aber keine Volumen-Veränderung bei der Reaktion eintreten.

$$RG = \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

$\Delta c$  .. Konzentrationsänderung

Dieser Ausdruck ist die zentrale Gleichung für die Reaktions-Geschwindigkeit. Von ihr lassen sich weitere Formeln ableiten. Die typische Einheit der Reaktions-Geschwindigkeit ist:

$$\frac{\text{mol}}{\text{l} \cdot \text{s}} \quad \text{andere Schreibweisen: } \text{mol} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{od.} \quad \text{mol}/(\text{l} \cdot \text{s})$$

Bei Gasen ist die Konzentration durch den Partialdruck ersetzt werden. Dabei gelten:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$p$  .. Druck

$R$  .. universelle Gas-Konstante =  $8,314 \text{ J / mol K}$

$T$  .. Temperatur [K]

$$p = p_i[A] + p_i[B] + \dots + p_i[Z]$$

$p_i$  .. Partial-Druck eines Gas-Bestandteils

$A, B, \dots Z$  .. Gas-Bestandteile

Bei konstanten Volumen ist die Stoffmenge  $n$  zum (Partial-)Druck proportional. Dadurch lässt sich auch:

$$RG = \frac{\Delta p_i}{\Delta t}$$

zur Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeit benutzen:

Hat man es mit einer Reaktion zu tun, die z.B. ein Gas bildet bzw. aus dem Reaktions-Raum entzieht, dann kann auch mit Volumenveränderungen bei der Ermittlung der Reaktions-

Geschwindigkeit gearbeitet werden. Schließlich sind das Volumen und die Stoffmenge eines Stoffes (bei konstantem Druck und Temperatur) ebenfalls proportional zueinander.

$$RG = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \text{bei } p = \text{const.}$$

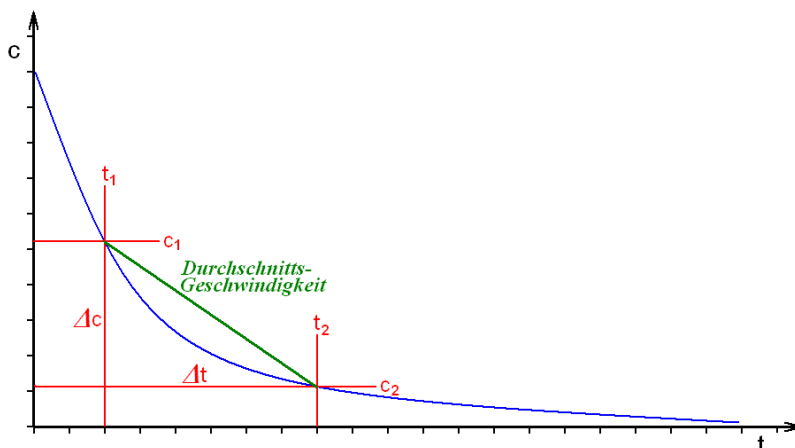
RG .. Reaktionsgeschwindigkeit  
 $\Delta V$  .. Volumenänderung  
 $\Delta t$  .. Zeitdifferenz (abgelaufene Zeit, Zeitänderung)

Mit diesen Formeln lässt sich die Durchschnitts-Geschwindigkeit für einen Zeitraum berechnen.

Graphisch entspricht die Durchschnitts-Geschwindigkeit der Steigung der Gerade (Sekan-te bezüglich der Kurve) zwischen den beiden Mess-Punkten.

Mathematisch ist die Berechnung von Geraden – ihres Anstieges und des Schnittpunktes auf der y-Achse – ein relativ einfaches Verfahren.

Der Anstieg der Geraden ist negativ.



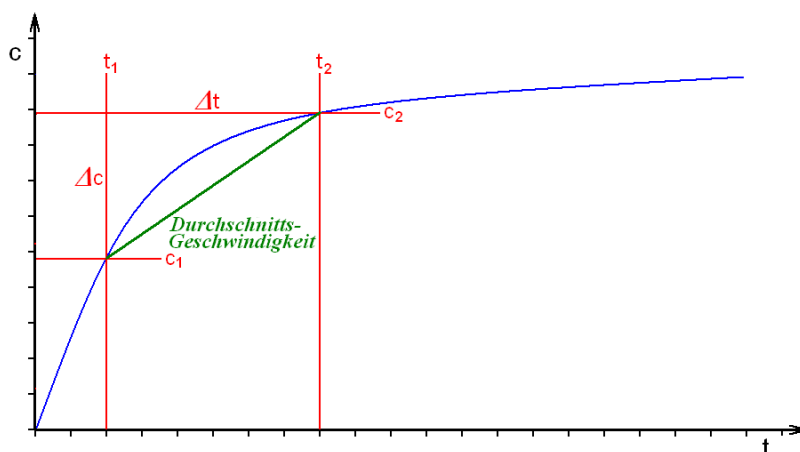
$$RG = \frac{c_2 - c_1}{t_2 - t_1}$$

RG .. Reaktionsgeschwindigkeit  
 $c_x$  .. Konzentration zum Zeitpunkt x / am Meßpunkt x  
 $t_x$  .. Zeitpunkt x / Meßzeitpunkt x

Reaktionsgeschwindigkeit für den Umsatz der Ausgangsstoffe besitzt nach dieser Formel ein negatives Vorzeichen (da  $c_1$  größer als  $c_2$  ist, ergibt sich negative Differenz)

Betrachtung für die Reaktionsprodukte

Bei der Betrachtung der Reaktions-Geschwindigkeit aus der Sicht der Reaktionsprodukte muss aber beachtet werden, dass jetzt eine Zunahme der Konzentration auftritt und somit die Reaktionsgeschwindigkeit einen positiven Wert (Anstieg der Gerade) erhält. In der Praxis wird die Reaktionsgeschwindigkeit als negierter Wert benutzt.



Das entspricht mehr unserem Verständnis von Reaktionen.

$$RG[\text{Edukt}] = - \frac{c_2 - c_1[\text{Edukt}]}{t_2 - t_1}$$

RG .. Reaktionsgeschwindigkeit  
 $c_x$  .. Konzentration zum Zeitpunkt x / am Meßpunkt x  
 $t_x$  .. Zeitpunkt x / Meßzeitpunkt x

Für die Reaktionsgeschwindigkeit bezüglich der Produkte ergibt sich entsprechend:

$$RG[\text{Produkt}] = \frac{c_2 - c_1[\text{Produkt}]}{t_2 - t_1}$$

$$RG[\text{Produkt}] = -RG[\text{Edukt}]$$

### Definition(en): Reaktions-Geschwindigkeit (Durchschnitts-Geschwindigkeit)

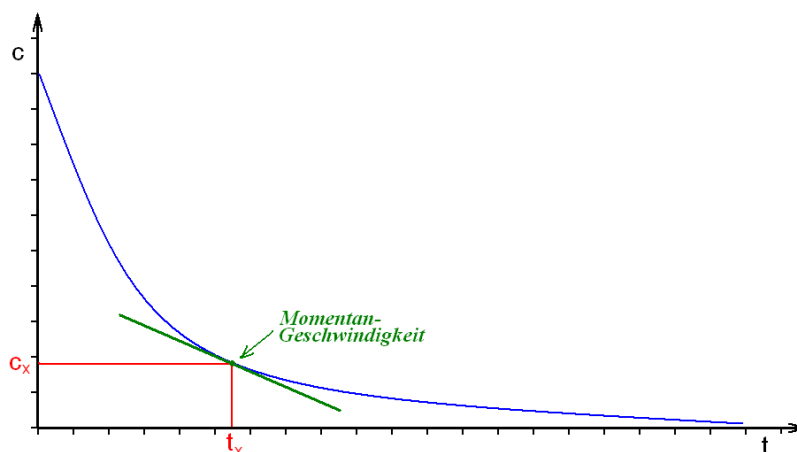
Die Durchschnitts-Geschwindigkeit einer Reaktion beschreibt den gemittelten Stoff-Umsatz innerhalb eines bestimmten Zeit-Abschnittes.

### von der Durchschnitts-Geschwindigkeit zur Momentan-Geschwindigkeit

Durch Verkleinern der Zeitabschnitte gelangen wir zur theoretischen Situation, dass die Zeitdifferenz gleich Null wird:

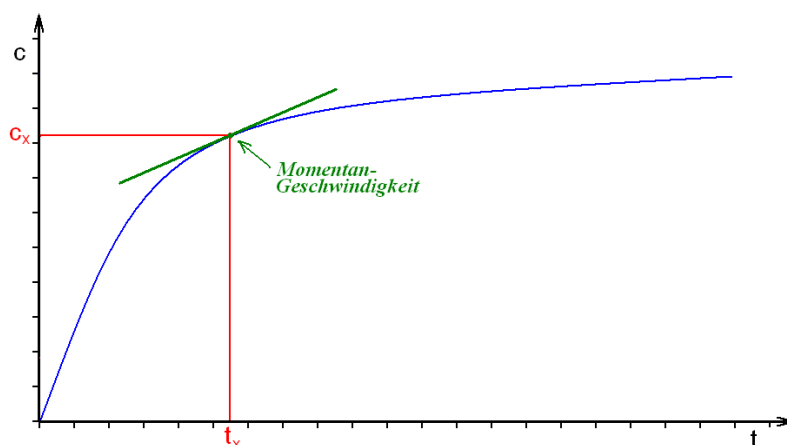
$$RG = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

Dadurch wird aus der Sekante eine Tangente. Praktisch bedeutet dieses, dass wir statt der Durchschnitts-Geschwindigkeit nun eine Momentan-Geschwindigkeit genau für den Berechnungszeitpunkt erhalten. Die Momentan-Geschwindigkeit lässt sich nicht messen – nur berechnen.



Unter Anwendung der Regeln und Verfahren der Differential-Rechnung kommen wir zur Berechnungs-Formel:

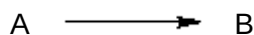
$$RG = \frac{dc}{dt}$$



## die Reaktions-Geschwindigkeits-Konstante k

Durch Experimente lässt sich feststellen, von welchen Faktoren die Reaktions-Geschwindigkeit abhängig ist. Neben den Umgebungs-Bedingungen, wie Temperatur, Druck, Licht usw. interessieren vor allem die inneren System-Zusammenhänge. Aus den oben besprochenen Sachverhalten können wir schon voraussagen, dass die eine oder andere chemische Reaktion auch von der Konzentration der Stoffe abhängig sein wird.

Betrachten wir die Modell-Reaktion:



Aus der Erfahrung wissen wir, dass eine Reaktion von der Konzentration eines Stoffes abhängig ist. Diese Erfahrung können wir als Annahme auch für den Umsatz von A zu B annehmen. Bei Annahme eines proportionalen Zusammenhangs:

$$RG \sim c[A]$$

ergibt sich für die negativ definierte Reaktionsgeschwindigkeit:

$$-\frac{dc[A]}{dt} \sim c[A]$$

Bringt man nun einen Proportionalitäts-Faktor k ein, dann ergibt sich:

$$RG = -\frac{dc[A]}{dt} = k \cdot c[A]$$

Der Proportionalitäts-Faktor wird nun **Geschwindigkeits-Konstante k** genannt. Der von uns angenommene Zusammenhang konnte in Experimenten bestätigt werden.

Mit Hilfe der für eine Reaktion spezifischen Geschwindigkeits-Konstanten k lässt sich also die Reaktions-Geschwindigkeit für jede beliebige Konzentration berechnen.

Die obige Gleichung für die Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeit wird auch **Zeitgesetz** oder **Geschwindigkeits-Gleichung** genannt.

Das Zeitgesetz kann nun natürlich auch zur Berechnung der Konstanten benutzt werden.

$$k = \frac{RG}{c[A]} \quad \left[ \frac{1}{s} \right] = \frac{\left[ \frac{\text{mol}}{\text{l} \cdot \text{s}} \right]}{\left[ \frac{\text{mol}}{\text{l}} \right]}$$

### Aufgaben:

**1. Berechnen Sie die Reaktionsgeschwindigkeit für die Reaktion:**



**Es sollen die folgenden Konzentrationen betrachtet werden:**

| Konzentration A [mol/l]  | 5 | 2 | 1 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,05 |
|--------------------------|---|---|---|-----|-----|-----|------|
| Reaktionsgeschwindigkeit |   |   |   |     |     |     |      |

**Die tabellierte Geschwindigkeits-Konstante beträgt:  $0,062 \text{ s}^{-1}$**

**2. Stellen Sie die in Aufg. 1 ermittelten Daten in einem geeigneten Diagramm dar!**

**3. Bestimmen Sie die Geschwindigkeits-Konstante zu den folgenden experimentellen Daten:**

| Konzentration A [mol/l]  | 5     | 2    | 1   | 0,5  | 0,2  | 0,1  | 0,05 |
|--------------------------|-------|------|-----|------|------|------|------|
| Reaktionsgeschwindigkeit | 22,57 | 9,37 | 4,5 | 2,19 | 0,92 | 0,47 | 0,22 |

---

Bei der Beispiel-Reaktion:



wird man feststellen, dass die Reaktions-Geschwindigkeit sowohl von der Konzentration des Stoffes A, wie auch von der des Stoffes B abhängig ist.

$$\begin{array}{lll} RG = f(c_A) & \text{od. auch} & RG \approx c_A \\ RG = f(c_B) & \text{od. auch} & RG \approx c_B \end{array}$$

Auch der gesunde Verstand lässt uns diese Beziehung verstehen. Trotzdem muss sie natürlich praktisch geprüft werden.

Die genaue Untersuchung und der mathematischen Auswertung – mit der Suche nach einem Zusammenhang – ergibt die gemeinsame Abhängigkeit von beiden Konzentrationen:

$$RG = f(c_A, c_B) \quad \text{od. auch} \quad RG \approx c_A \cdot c_B$$

Wie aus der Physik bekannt, suchen wir nun einen Proportionalitäts-Faktor, der die beiden Seiten des Zusammenhanges zu einer Gleichung verbindet:

$$RG = k \cdot c_A \cdot c_B \quad \textbf{Reaktionsgeschwindigkeits-Gesetz}$$

Dieser Faktor erhält traditionell zuerst einmal die Bezeichnung k und wird ev. durch eine Stoff-spezifische bzw. Reaktions-spezifische Größe ersetzt.

Eine gemeinsame Abhängigkeit von den Teilchenzahlen von A und B können wir schon bei Benutzen der Erkenntnisse aus der Stoß-Theorie ([→ 5.1.1. die Stoß-Theorie](#)) schließen. Dort haben wir die gegenseitige Beeinflussung mit einfachen Zahlenspielen darstellen können.

Der Faktor k ist mindestens abhängig vom Anteil geeigneter (z.B. heteromolekularer Zusammenstöße) und vom Anteil effektiver Stöße (Überschreitung der Aktivierungs-Energie).

Die Werte für k lassen sich tabellarisch erfassen. Dazu hat man sich bei den Umgebungsbedingungen hinsichtlich der Temperatur auf 25 °C (298 K) und einem (Luft-)Druck von 1 at (1013,25 hPa = 1013 mmHg = 760 Torr = 760 mmWS = 1 bar) als Vergleichswert festgelegt. Man nennt diese deshalb auch Standard-Bedingungen. Abweichende Werte müssen extra angegeben werden. Das ist z.B. für Reaktionen notwendig, die z.B. bei Zimmer-Temperatur praktisch gar nicht ablaufen.

Das Prinzip lässt sich nun auf Reaktionen mit beliebig vielen Reaktions-Partnern erweitern. Theoretisch gilt für die Modell-Reaktion:

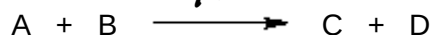


$$RG = k \cdot c_A \cdot c_B \cdot c_C \cdot \dots \quad \textbf{allgemeines Reaktionsgeschwindigkeits-Gesetz}$$

allg. Zeitgesetz; allg. Geschwindigkeits-Gleichung

### Aufgaben:

1. Stellen Sie das Zeitgesetz für eine Reaktion mit 5 Ausgangsstoffen und 3 Reaktionsprodukten auf!
2. Welche Einheit hat eine Geschwindigkeits-Konstante für eine Reaktion mit zwei Ausgangsstoffen? Erläutern Sie Ihre Ableitung!
3. Geben Sie eine allgemeine Formel für die Bestimmung der Einheit einer Reaktion mit beliebig vielen Ausgangsstoffen an!
4. Berechnen Sie die Reaktionsgeschwindigkeit mit einer Geschwindigkeits-Konstante von für die Reaktion:



Es sollen die folgenden Konzentrationen betrachtet werden:

|                          |   |   |   |     |     |     |      |
|--------------------------|---|---|---|-----|-----|-----|------|
| Konzentration A [mol/l]  | 5 | 2 | 1 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,05 |
| Konzentration B [mol/l]  | 2 | 2 | 2 | 2   | 2   | 2   | 2    |
| Reaktionsgeschwindigkeit |   |   |   |     |     |     |      |

|                          |   |   |   |     |     |     |      |
|--------------------------|---|---|---|-----|-----|-----|------|
| Konzentration A [mol/l]  | 5 | 2 | 1 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,05 |
| Konzentration B [mol/l]  | 5 | 2 | 1 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,05 |
| Reaktionsgeschwindigkeit |   |   |   |     |     |     |      |

5. Berechnen Sie die Geschwindigkeits-Konstante für die folgenden experimentellen Befunde!

|                          |       |       |      |      |      |      |      |
|--------------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| Konzentration A [mol/l]  | 5     | 2     | 1    | 0,5  | 0,2  | 0,1  | 0,05 |
| Konzentration B [mol/l]  | 5     | 5     | 2    | 2    | 1    | 1    | 1    |
| Reaktionsgeschwindigkeit | 27,07 | 10,29 | 2,08 | 1,08 | 0,21 | 0,11 | 0,05 |



### Aufgaben (zum Experiment / Spiel):

1. Lesen Sie sich die Beschreibung des Spiel's (Modell-Experiment's) durch!  
Modell-Reaktion:  $2A \longrightarrow 2B$
2. Wie wird aus Ihrer Sicht ein abgeleitetes Diagramm aussehen, in dem für die Spielzüge (Takte) die Anzahlen der Erbsen A und B dargestellt werden?
3. Skizzieren Sie ein passendes Diagramm und begründen Sie die vermutete Kurven-Form! (Sollten mehrere Möglichkeiten bestehen (z.B. Schwankungen od.ä.), dann kennzeichnen Sie das in der Skizze durch mehrere dünnere Kurven oder einen schattierten Bereich.)
4. Führen Sie das Modell-Experiment / Spiel einmal durch!
5. Erstellen Sie ein passendes Diagramm auf Millimeter-Papier!
6. Erklären Sie den Verlauf Ihrer Kurve!
7. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit denen anderer Kurs-Teilnehmer / Team's!

### Modell-Experiment / Spiel: Erbsen-Doppel

Benötigt werden:

- 50 gelbe Erbsen  $\rightarrow$  A; 50 grüne Erbsen  $\rightarrow$  B
- (alternativ: unterschiedlich gefärbte Kugeln, Bohnen gleicher Größe)
- hoher undurchsichtiger Becher oder Becherglas mit Papier-Umrandung (als Sichtschutz) oder ähnliches als (Stochastik-) "Urne"
- Würfel

Ablauf:

1. Befüllen der Urne mit den gelben Erbsen
2. Festlegen der Anzahl der Ziehungen (Spielzüge) (z.B. 50)  $\rightarrow$  Takte
3. Festlegen des minimalen Punktwertes auf dem Würfel (z.B. 5)  $\rightarrow$  Zielwert
4. Ziehen von 2 Erbse aus der Urne
5. WENN mindestens eine Erbse grün ist, DANN weiter bei 6.
  - a. bei beide Erbsen gelb: einmal Würfel
  - b. WENN Würfelwert größer od. gleich ist wie der festgelegte Zielwert, DANN Austausch der gelben Erbsen durch zwei grüne
6. ev. Veränderung und neue Anzahlen (für jede Ziehung (jeden Spielzug, Takt)) notieren
7. weiter bei 4. bis Anzahl gewünschte Ziehungen erreicht ist

für die gehobene Anspruchsebene:

8. Setzen Sie das Modell-Experiment in eine Tabellenkalkulation um (siehe z.B. Abb.) und lassen Sie sich ein passendes Diagramm erstellen!

|     |                                                                       |          |          |                 |                 |                   |        |                |
|-----|-----------------------------------------------------------------------|----------|----------|-----------------|-----------------|-------------------|--------|----------------|
| K33 |                                                                       |          |          |                 |                 |                   |        |                |
|     | A                                                                     | B        | C        | D               | E               | F                 | G      | H              |
| 1   | <b>Modell-Experiment Erbsen (stochastisch, spielerisch)</b>           |          |          |                 |                 |                   |        |                |
| 2   | <b>2 A ---&gt; 2 B</b>                                                |          |          |                 |                 |                   |        |                |
| 3   |                                                                       |          |          |                 |                 |                   |        |                |
| 4   | <b>Ablauf</b> 1. 2 Erbsen zufällig wählen (aus undurchsichtiger Urne) |          |          |                 |                 |                   |        |                |
| 5   | 2. erwürfeln einer Energie                                            |          |          |                 |                 |                   |        |                |
| 6   | 3. bewerten der Erbsen (richtig (2x A) und mindestens notw.           |          |          |                 |                 |                   |        |                |
| 7   | EA (Aktivierungs-Energie)), dann Austausch gegen 2x B                 |          |          |                 |                 |                   |        |                |
| 8   |                                                                       |          |          |                 |                 |                   |        |                |
| 9   | Start                                                                 |          |          |                 |                 |                   |        | min EA (1-->6) |
| 10  | 30                                                                    |          | 0        |                 |                 |                   |        | 5              |
| 11  |                                                                       |          |          |                 |                 |                   |        |                |
| 12  | Takt                                                                  | Erbsen A | Erbsen B | gezogene Erbse1 | gezogene Erbse2 | erwürfelte Energ. | Umsatz |                |
| 13  | 0                                                                     | 30       | 0        | A               | A               | 4                 | 0      |                |
| 14  | 1                                                                     | 30       | 0        | A               | A               | 5                 | 1      |                |
| 15  | 2                                                                     | 28       | 2        | A               | A               | 6                 | 1      |                |
| 16  | 3                                                                     | 26       | 4        | A               | B               | 1                 | 0      |                |
| 17  | 4                                                                     | 26       | 4        | B               | A               | 5                 | 0      |                |

Ausschnitt (Anfang) einer Simulation  
mit einer Tabellenkalkulation

Natürlich lässt der Sachverhalt auch deterministisch simulieren.

Zu beachten ist natürlich, dass das Ereignis "es werden 2 Erbsen A gezogen" unwahrscheinlicher ist, als bei unserer ersten deterministischen Erbsen-Simulation.

|    | A                                                             | B                                                                 | C               | D               | E                         | F                          | G | H |
|----|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|----------------------------|---|---|
| 1  | <b>Modell-Experiment Erbsen (deterministische Simulation)</b> |                                                                   |                 |                 |                           |                            |   |   |
| 2  |                                                               |                                                                   |                 |                 |                           |                            |   |   |
| 3  |                                                               | Ablauf 1. Berechnung "gezogener" Erbsen 2x A (gemittelt)          |                 |                 |                           |                            |   |   |
| 4  |                                                               | 2. ermitteln der "Reaktions-fähigen" Erbsen A (Anteil, gemittelt) |                 |                 |                           |                            |   |   |
| 5  |                                                               |                                                                   |                 |                 |                           |                            |   |   |
| 6  |                                                               |                                                                   |                 |                 |                           |                            |   |   |
| 7  |                                                               |                                                                   |                 |                 |                           |                            |   |   |
| 8  |                                                               | Start                                                             |                 | gezogen insg.   |                           | min EA (1-->6)             |   |   |
| 9  |                                                               | 300                                                               | 0               | 10              |                           | 3                          |   |   |
| 10 |                                                               |                                                                   |                 |                 |                           |                            |   |   |
| 11 |                                                               | <b>Takt</b>                                                       | <b>Erbsen A</b> | <b>Erbsen B</b> | <b>gezogene Erbsen AA</b> | <b>Anteil reag. Erbsen</b> |   |   |
| 12 |                                                               | 0                                                                 | 300,0           | 0,0             | 10,00                     | 6,67                       |   |   |
| 13 |                                                               | 1                                                                 | 293,3           | 6,7             | 9,56                      | 6,37                       |   |   |
| 14 |                                                               | 2                                                                 | 287,0           | 13,0            | 9,15                      | 6,10                       |   |   |
| 15 |                                                               | 3                                                                 | 280,9           | 19,1            | 8,76                      | 5,84                       |   |   |

Problem der Messung der Reaktions-Geschwindigkeit

je länger die Messung dauert, umso mehr handelt es sich bei der gemessenen und berechneten Geschwindigkeit dann um eine Durchschnitts-Geschwindigkeit

Zur Ermittlung der Reaktions-Geschwindigkeit eignen sich statische oder dynamische Verfahren / Meß-Anordnungen

### statische Verfahren / Meß-Anordnungen

Das Reaktions-Gemisch befindet sich in einem geeigneten, temperierten (z.B. 298 K) Reaktions-Gefäß. In festgelegten Zeit-Abschnitten werden entweder kleine Stoff-Proben entnommen oder das gesamte Stoff-Gemisch quantitativ analysiert. Zur Verfolgung einer Reaktion (z.B. für die fortlaufende Beobachtung der Gesamt-Menge) eignen sich z.B. partielle Gas-Drücke, die elektrische Leitfähigkeit, die Licht-Durchlässigkeit (Absorption), die Wärme-Leitfähigkeit und / oder das Volumen.

Viele Größen lassen sich auch kontinuierlich verfolgen, was die Mess-Genauigkeit deutlich verbessert.

Die statischen Verfahren eignen sich vor allem für langsamere Reaktionen.

Bei zeitlich aufwendigeren Analysen kann die Probe durch geeignete Verfahren "fixiert" werden, damit sie nicht weiter reagiert. Dazu kann man z.B. tiefe Temperaturen, starke Verdünnungen oder Fixiermittel nutzen. Die überschüssig zugesetzten Fixiermittel reagieren meist nur mit einem der Reaktions-Partner und der andere kann dann messtechnisch erfasst werden.

### dynamische Verfahren / Meß-Anordnung

Bei den dynamischen Verfahren strömt das Reaktions-Gemisch an der Mess-Einrichtung vorbei. Hier wird direkt oder indirekt die Konzentration eines oder mehrerer Reaktions-Partner erfasst.

Sind mehrere Mess-Einrichtungen in einem Röhren-artigen Reaktions-Gefäß über die Länge verteilt, dann lässt sich die Veränderung quasi simultan erfassen.

Gibt es nur eine Mess-Einrichtung (z.B. am Rohr-Ende), dann lassen sich durch Variation der Strömungs-Geschwindigkeit verschiedene Reaktions-Zeitpunkte erfassen.

### Aufgaben:

1. Lesen Sie sich die folgende Versuchs-Beschreibung durch!
2. Erstellen Sie ein Kurz-Protokoll mit einer Stickpunkt-artigen Vorbetrachtung! Gehen Sie darauf ein, welche Teile des Modell's für welche chemischen Sachverhalte stehen sollten! Die Vorbetrachtung sollte weiterhin eine Skizze für das vermutete Diagramm (quasi experimentelle These) und eine kurze Erklärung dafür enthalten!
3. Führen Sie den Modell-Versuch durch!
4. Vervollständigen Sie das Kurz-Protokoll (Stichwort-artig)

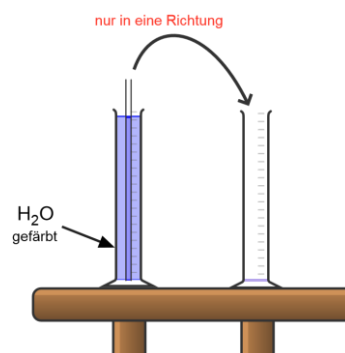
### Modell-Experiment zum Verlauf einer chemischen Reaktion (Hebe-Modell)

#### **Materialien / Geräte:**

2 Meß-Zylinder; Glasrohr (länger als die Höhe der Meß-Zylinder); Leitungswasser (ev. mit Lebensmittel-Farbe etwas angefärbt)

#### **Hinweise:**

- der Versuch kann zum Vergleich mit verschiedenen dicken Glasrohren gestartet werden
- das Glasrohr muss immer in dem einen Zylinder gefüllt und in dem anderen gelehrt werden (Flüssigkeits-Transport erfolgt nur von dem einem zum anderen Zylinder!)
- Glasrohr optimalerweise am Zylinder-Glas angelegt auslaufen lassen



#### **Durchführung / Ablauf:**

- der eine Zylinder wird bis zum höchsten Wert mit Wasser gefüllt
- solange Wiederholen, bis fünfmal keine Änderungen der Meßwerte mehr aufgetreten sind
  - Glasrohr bis auf den Grund in den linken Zylinder eintauchen
  - Rohr mit dem Daumen verschließen
  - Rohr zum anderen Zylinder führen und durch Abheben des Daumens entleeren
  - leeres Rohr wieder zum anderen Zylinder zurückbewegen
  - Wasser-Volumen in beiden Zylinder notieren

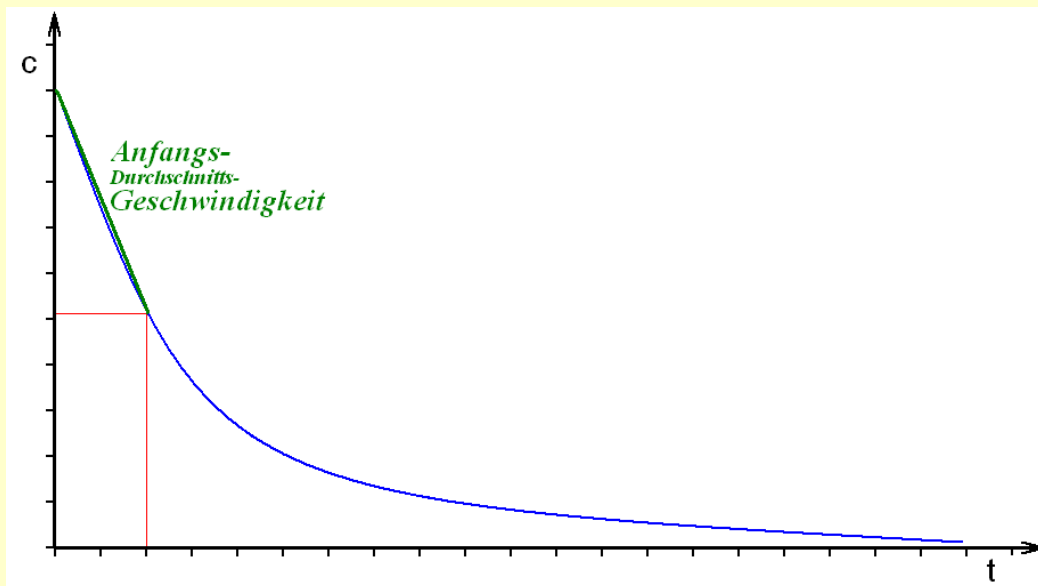
#### **Auswertungen / Berechnungen:**

- überlegen Sie sich, welche Details im Modell für welche chemischen Sachverhalte stehen
- stellen Sie die Meßwerte für beide Zylinder gegen die Arbeits-Takte in einem Diagramm dar

## Methode der Anfangsgeschwindigkeit

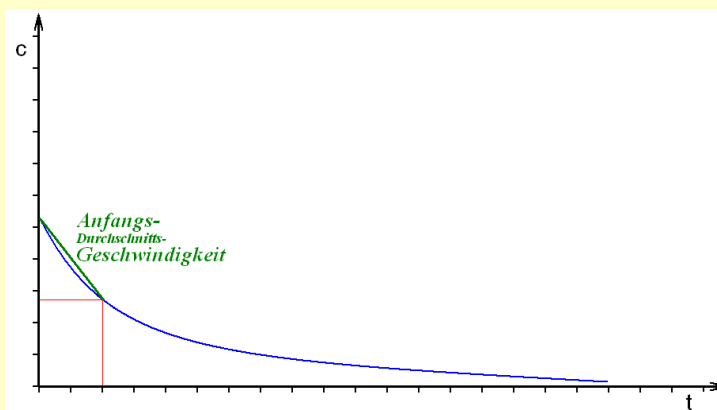
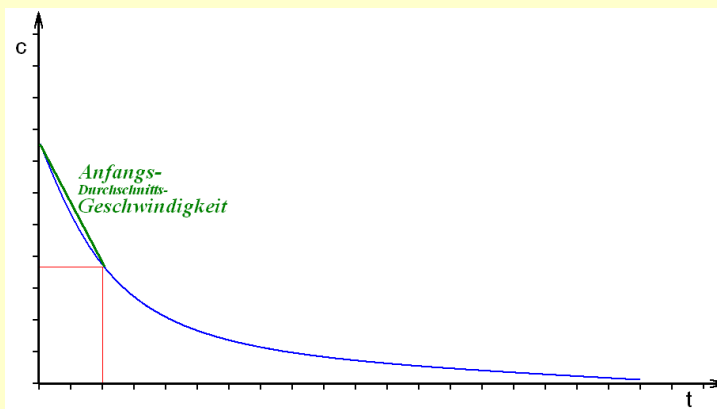
Da die Verfolgung von Konzentrationen oder Stoffmengen bzw. Massen während einer chemischen Reaktion problematisch ist – man würde einfach zu stark und zu häufig in das Geschehen eingreifen – versucht man die Reaktion in ihrem Anfangs-Stadium zu beobachten.

Das hat den Vorteil, dass man vor dem Reaktionsablauf alle Stoff-Meßgrößen (Stoffmengen usw.) in Ruhe bestimmen kann. Günstig ist auch das Fehlen von Reaktions-Produkten, die schon durch ihre Anwesenheit (aber auch durch ev. Rück-Reaktionen) den Reaktions-Verlauf behindern würden.



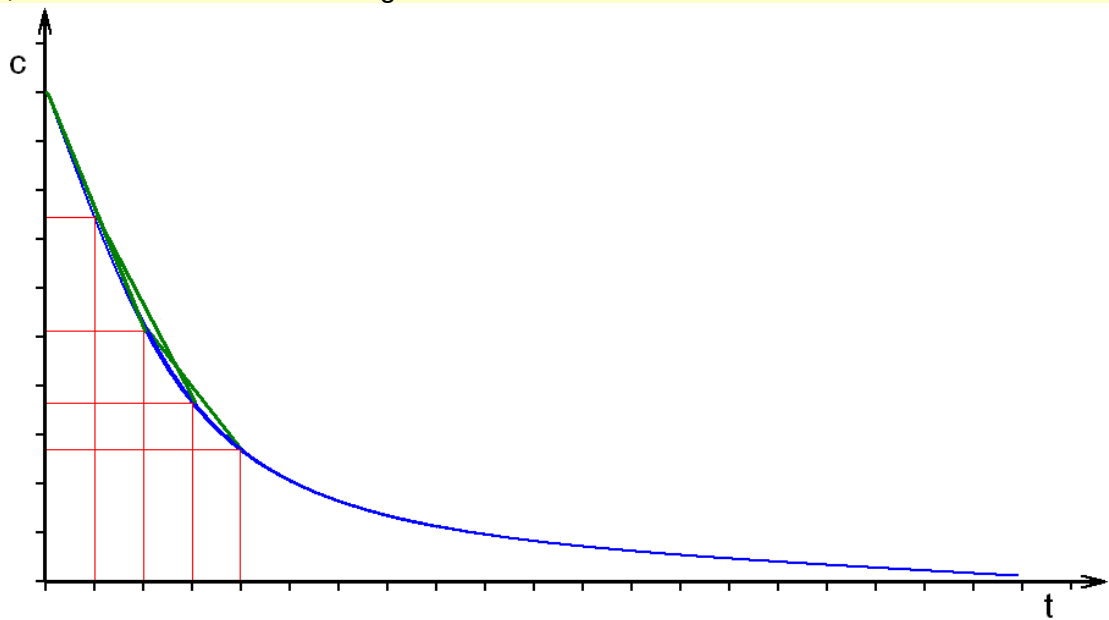
Dann läßt man die Reaktion ablaufen. Nach einer bestimmten Zeit unterbricht man dann die Reaktion und vermisst neu. Da zum Beginn einer Reaktion die Veränderungen besonders deutlich sind, hat man hier auch beste Meßbedingungen. Ein weiterer Vorteil der fast gleichmäßige (lineare) Verlauf der Reaktions-Geschwindigkeit in der Anfangsphase der Reaktion. Zumindestens kann man von einem linearen Verlauf ausgehen, muss aber einen gewissen Fehler akzeptieren. Dadurch lassen sich einfachste mathematische Methoden zur Auswertung heranziehen.

Geht man von unterschiedlichen Ausgangs-Konzentrationen aus, dann kann man nach und nach die Meßpunkte für die Gesamt-Reaktion ergänzen. Statt also die Reaktion zu unterbrechen oder laufend zu verfolgen, startet man die Reaktion



für "jede" Konzentration einfach neu.

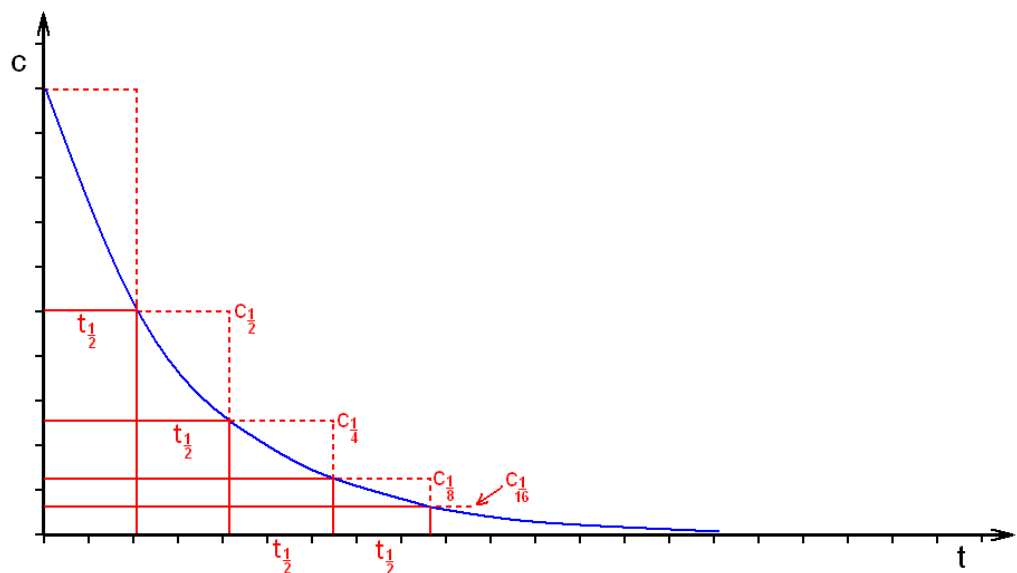
Durch Kombination aller Meß- und Berechnungs-Werte kommt man dann zu einem Diagramm, dass schon sehr exakt den gesamten Reaktions-Verlauf darstellt.



### Halbwert-Zeit $t_{1/2}$ bzw. $\tau_{1/2}$

#### **Definition(en): Halbwert-Zeit**

Die Halbwertzeit ist die Zeit-Einheit, in der sich die Hälfte der Teilchen der Ausgangs-Stoffe umgesetzt hat.

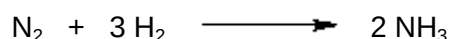


### 5.3.1.1. Reaktionsordnung



Wenn man bestimmte chemische Reaktionen in ihren Gleichungen betrachtet und auf sie die Stoß-Theorie anwendet, dann müssen scheinbar eine große Zahl von Teilchen gleichzeitig miteinander zusammentreffen, um die Reaktion ablaufen zu lassen. Dies wird auch durch die Berechnungen der Reaktions-Geschwindigkeit und der Geschwindigkeits-Konstanten suggeriert. Da gehen die Konzentrationen zur x-ten Potenz ein, wenn der Stoff mit mehr als einem Mol in der Gleichung steht.

Nehmen wir kurz das Beispiel der Ammoniak-Synthese:



Es schaut so aus, als müsste sich ein Stickstoff-Molekül mit genau drei Wasserstoff-Molekülen treffen, um zwei Ammoniak-Moleküle zu bilden. Die Reaktion müsste entsprechend von allen Konzentrationen der gleichzeitig "zusammenstoßenden" Stoffe abhängig sein. Die Reaktions-Geschwindigkeit ergäbe sich also nach der Formel:

$$RG = k \cdot c_{\text{N}_2} \cdot c_{\text{H}_2}^3$$

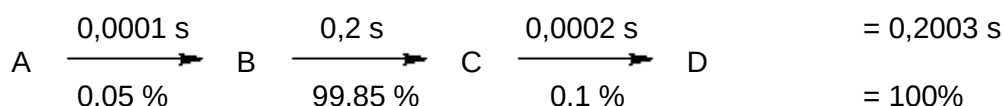
Praktisch stellen sich aber ganz andere Verhältnisse heraus. Da liegt man mit der Formel:

$$RG = k \cdot c_{\text{N}_2} \cdot c_{\text{H}_2}$$

weitaus besser. Scheinbar reichen schon die Kontakte von zwei Teilchen (Stickstoff und Wasserstoff) aus, um die Reaktion kinetisch zu beschreiben.

Der Widerspruch lässt sich klären, wenn man sich vergegenwärtigt, dass Reaktionen im Detail ganz anders ablaufen. Zuerst treffen ev. sich die ersten Teilchen, reagieren zu einem Zwischen-Produkt, was dann mit dem nächsten Teilchen reagiert. Dieses Teilchen könnte das Reaktions-Produkt sein oder wieder nur ein Zwischen-Produkt, was noch weiter reagieren muss.

Scheinbar komplizierte Reaktionen bestehen immer aus kleineren Teil-Reaktionen (Reaktions-Schritte, Elementar-Reaktionen). Nur einige (wenige) dieser Teilschritte bestimmen dann wirklich über die Geschwindigkeit der Gesamt-Reaktion.



Die anderen – schnelleren Reaktionen beeinflussen die Gesamt-Geschwindigkeit kaum. Letztendlich ist die Gesamt-Geschwindigkeit praktisch nur von den Konzentrationen der Stoffe wirklich abhängig, die an der langsamen Teil-Reaktion beteiligt sind. Wir sprechen hier vom Geschwindigkeits-bestimmenden Schritt.

Für die obige Reaktions-Kette heißt das, dass nur die Konzentration von B entscheidend ist. Ist A vorhanden, wird dieses sehr schnell in B umgewandelt, wo sich nun die Reaktions-Kette staut. Ist dann (etwas) C gebildet, wird es sofort wieder in D umgewandelt.

Wenn z.B. eine Reaktion unter Beteiligung von Wasser verläuft, dann ist / müsste diese Reaktion von der Menge des Wassers abhängig sein. Spielt sich die Reaktion real in einer wässrigen Lösung ab, dann ist Wasser praktisch immer und reichlich vorhanden; seine Menge spielt dann praktisch keine Rolle mehr. Ist ist praktisch unendlich vorhanden.

Mit der Reaktions-Ordnung werden die Reaktionen dahingehend unterschieden, von wievielen Teilchen / Stoffen der Geschwindigkeits-bestimmende Reaktions-Schritt abhängig ist.

### Definition(en): Reaktions-Ordnung

Die Reaktions-Ordnung beschreibt die Anzahl von Teilchen, die für den Ablauf einer Reaktion zusammenkommen müssen.

Die Reaktions-Ordnung ist die Summe der Exponenten aus der Geschwindigkeits-Gleichung.

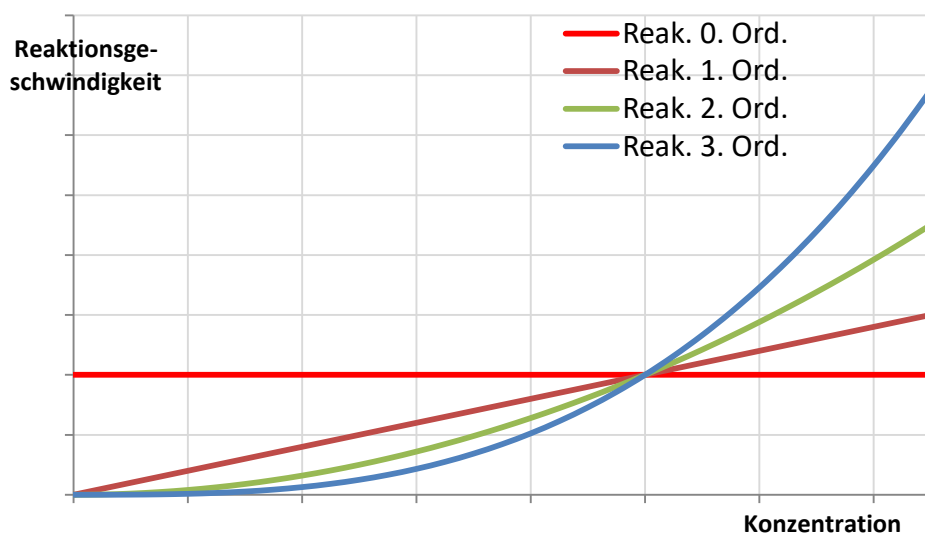
Dies ist äquivalent mit der Summe der Exponenten der Konzentration der Ausgangsstoffe im Massenwirkungs-Gesetz.

Die Reaktions-Ordnung ist der empirisch ermittelte Zusammenhang zwischen Reaktions-Geschwindigkeit und der Konzentration.

### Definition(en): Molekularität einer Reaktion

Die Reaktions-Ordnung beschreibt die Anzahl von Teilchen / Molekülen, die für den Ablauf des Geschwindigkeits-bestimmenden Schrittes einer Reaktion notwendig sind.

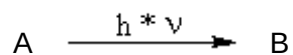
Die Molekularität beschreibt den Ablauf einer chemischen Reaktion bezüglich der beteiligten Teilchen(-Zahlen).



---

## Reaktion 0. Ordnung

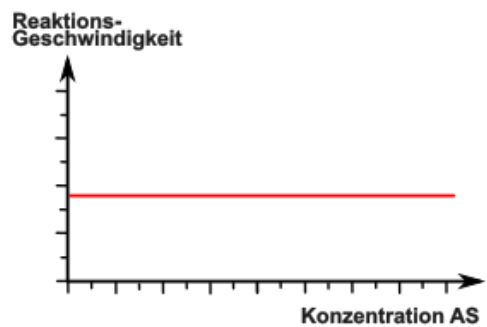
z.B. photochemische Reaktionen



$$RG = f(\emptyset)$$

$$RG = k$$

Reaktions-Geschwindigkeit ist nicht von Konzentration des (Ausgangs-)Stoffes abhängig.

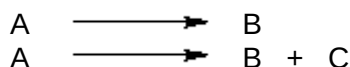


“Zeitgesetz 0.Ordnung“



## Reaktion 1. Ordnung

Katalytische Reaktionen und radioaktive Zerfalls-Prozesse gehören zu den monomolekularen Reaktionen. Sie sind nur von der Konzentration eines bzw. des Ausgangsstoffes abhängig.



$$RG = f(c_A)$$

$$RG = k \cdot c_A$$

Die Reaktions-Geschwindigkeit ist (nur) von Konzentration des Ausgangs-Stoffes abhängig. Konzentration und Reaktions-Geschwindigkeit verhalten sich proportional zueinander. Für eine bestimmte Konzentration können wir die Reaktionsgeschwindigkeit direkt aus dem Diagramm ablesen. Zum Berechnen benötigen wir  $k$  – die Geschwindigkeits-Konstante (entspr. dem Proportionalitäts-Faktor). Diese lässt sich als Anstieg  $m$  der linearen Funktion (Gerade) schnell berechnen.

Zur Erinnerung zeigen wir hier auch noch mal die Zusammenhänge für eine lineare Funktion in einem Diagramm (Abb. rechts).

Für das tägliche Arbeiten interessieren uns aber die zeitlichen Verläufe der Reaktionen und die dabei zu beobachtenden Konzentrations-Veränderungen.

Leider sind hier die Verläufe nicht linear. Zuerst nimmt die Konzentration sehr schnell ab. Mit immer geringer werdender (restlicher) Konzentration wird auch die Änderung immer geringer. Heute kann man solche Funktionen mit Schul-taschenrechnern lösen. Früher musste alles händisch erledigt werden. Da griff man dann auf das einfache Lösungs-Prinzip von linearen Gleichungen zurück.

Man muss dazu "nur" den ursprünglichen Zusammenhang in einen linearen transferieren.

Das gelang durch die logarithmische Darstellung der Konzentration.

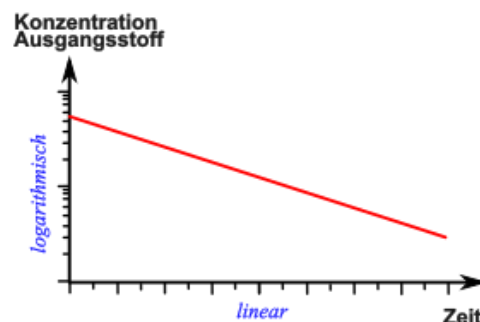
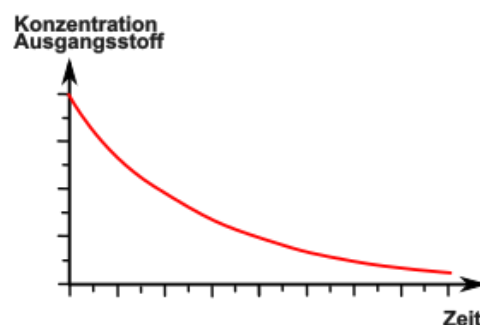
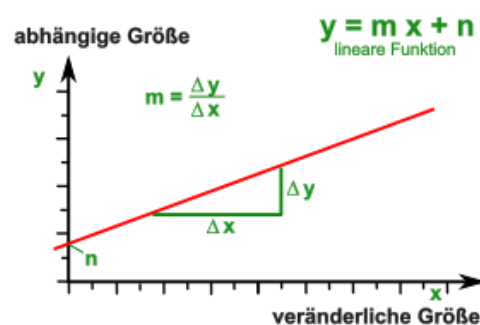
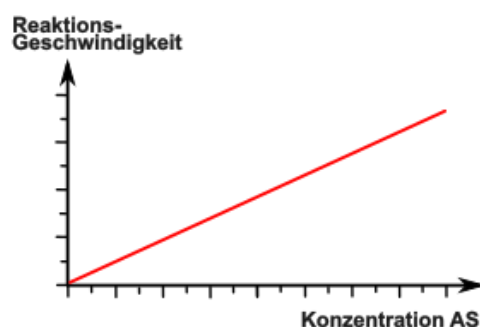
In diesem Diagramm konnte dann die Reaktions-Geschwindigkeit ( $k$  bzw.  $RG$ ) als Steigung der Geraden und die Ausgangs-Konzentration ( $c_0$ ) als Schnittpunkt auf der y-Achse (Abzisse) abgelesen werden.

Später konnte man das dann auch mathematisch herleiten.

Wir erinnern uns dazu an die Definition der Momentan-Geschwindigkeit:

$$RG = \frac{1}{v_A} \frac{dc_A}{dt} = - \frac{dc_A}{dt} = k_A$$

Im Fall einer monomolekularen Reaktion spricht man auch vom Zeitgesetz 1. Ordnung.



Durch Integrieren erhält man:

$$\ln c_t[A] - \ln c_0[A] = -k_A \cdot t \quad \text{oder:} \quad \ln \frac{c_t[A]}{c_0[A]} = -k_A \cdot t$$

Diese Form des Reaktionsgeschwindigkeits-Gesetzes heißt entsprechend **integriertes Reaktionsgeschwindigkeits-Gesetz**.

Praktisch interessiert uns häufig die Konzentration eines Stoffes nach einer bestimmten Warte-Zeit. Z.B. will man gerne wissen, wie groß noch die Konzentration des Stoffes nach einer bestimmten Lager-Zeit ist.

Natürlich interessiert auch bei einer Bildungs-Reaktion, welche Konzentration des Stoffes noch nach einer bestimmten Zeit vorliegt. Daraus können wir ja sehr einfach auf die Konzentration von irgendwelchen Reaktions-Produkten schließen.

Durch Umstellen lässt sich die Konzentration – ausgehend von einer bekannten Ausgangs-Konzentration – zu jeder beliebigen Reaktions-Zeit berechnen:

$$\ln c_t[A] = -k_A \cdot t + \ln c_0[A] \quad \text{bzw.:} \quad c_t[A] = e^{-k_A \cdot t} \cdot c_0[A]$$

Die erste Gleichung hat den Vorteil, dass wir hier quasi eine lineare Gleichung vorliegen haben, die nun auch gut graphisch dargestellt und weiter verwertet werden kann. Eben genau die, die wir vorne schon durch "Probieren" ermittelt hatten. Für lineare Gleichungen sind viele Berechnungen wesentlich einfacher, als z.B. für potentielle Funktionen.

$$\ln c_t[A] = -k_A \cdot t + \ln c_0[A]$$

$$y = m x + n$$

Ein anderes Szenario ist die Frage nach der Warte-Zeit, bis eine bestimmte Konzentration erreicht ist. Das könnte ein Mindestgehalt an Wirkstoffen in einem Medikament sein oder auch die Menge an giftigen Abbau-Produkten. Die Haltbarkeits-Aussagen für Lebensmittel beruhen z.B. ebenfalls auf diesem Ansatz. Hierzu stellen wir das integrierte Geschwindigkeits-Gesetz nach der Zeit  $t$  um:

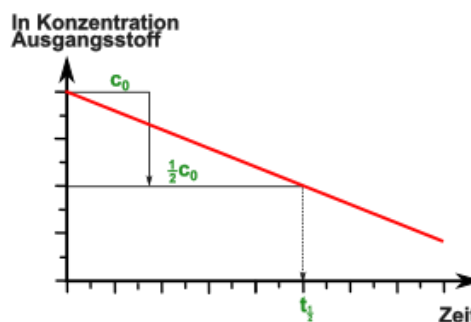
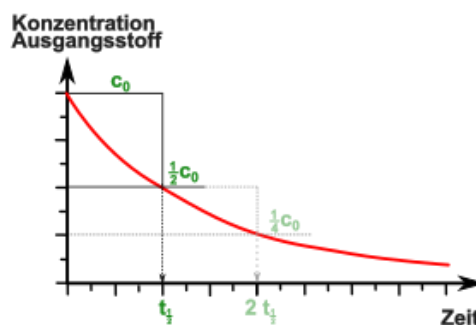
$$\frac{\ln c_t[A] - \ln c_0[A]}{-k} = t$$

Als charakteristisches Maß gilt hier die Halbwertszeit  $t_{1/2}$  bzw.  $\tau_{1/2}$ . Zur Berechnung nutzen wir die Ausgangs-Konzentration und dessen halbierten Wert:

$$\frac{\ln \frac{c_0}{2}[A] - \ln c_0[A]}{-k} = t_{1/2}$$

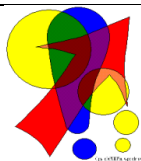
Je größer die Halbwertszeit, umso langsamer ist die Reaktion. Sie braucht länger, um auf die Hälfte der (Ausgangs-)Konzentration zu kommen. Kleinere Halbwertszeiten stehen für Reaktionen, die schneller auf den halben Konzentrations-Wert kommen.

Schlussendlich müssen wir auch irgendwie die Geschwindigkeits-Konstante ermitteln. Mit unserem integrierten Ansatz brauchen wir nun nur noch zwei Konzentrationen und die abgelaufene Zeit:



$$\frac{\ln c_t[A] - \ln c_0[A]}{-t} = k$$

In der Praxis nimmt man natürlich viele Werte – auch für die unterschiedlichsten Konzentrationen – auf, um so die Reaktions-Ordnung zu prüfen und das Ergebnis für die Konstante ausreichend statistisch zu sichern.



#### **Berechnungen mit Logarithmen:**

Vielfach ist der natürliche Logarithmus ( $\ln x$ , Logarithmus zur Basis  $e$ ) nicht ohne weiteres verfügbar. In Tabellenkalkulationen (z.B. EXCEL od. CALC) kann man die LOG-Funktion nutzen. Gibt man nur einen Parameter an, dann ist der Logarithmus zur Basis 10 (= dekadischer Logarithmus;  $\lg x$ ) gemeint. Gibt man einen zweiten Parameter an, dann wird dieser als Basis interpretiert.

Mit dem Aufruf LOG(3,5 ; 2,7183) erhält man so den natürlichen Logarithmus von 3,5.

Kennt man die Näherung von der EULERSchen Zahl  $e$  nicht, dann hilft ein anderer Trick. Wir berechnen einfach die Exponential-Funktion mit dem Parameter 1 – also  $e^1$ . In EXCEL ist das der Term EXP(1).

Ansonsten lässt sich der natürliche Logarithmus in den dekadischen über die folgende Beziehung umrechnen:

$$\ln x = \frac{1}{M} \lg x \quad \text{mit} \quad \frac{1}{M} = \ln 10 \approx 2,3026$$

#### **Aufgaben:**

1. Für eine Reaktion  $A \longrightarrow 2 B$  ist die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante  $k$  mit  $0,000'000'7 \text{ s}^{-1}$  bekannt. Zum Anfang lag eine Konzentration von  $25 \text{ mol/l}$  vor. Berechnen Sie ...
  - a) die Konzentration, die nach 10 Stunden noch vorliegt,
  - b) die Zeit, bis eine Konzentration von  $24 \text{ mol/l}$  erreicht ist,
  - c) die mögliche Lager-Zeit von A, wenn die Reinheit mit mindestens 98 % als akzeptabel angesehen wird,
  - d) die Reaktions-Zeit, an der eine Konzentration von  $1 \text{ mol/l}$  von B im Behälter vorhanden ist,
  - e) die Anfangs-Konzentration, wenn nach 3 Tagen noch  $12,5 \text{ mol/l}$  beobachtet wurden!
2. In einen gleichmäßig kalten Bergsee mit einem Wasserkörper von  $1'287 \text{ m}^3$  mit einer durchschnittlichen Temperatur von  $10^\circ \text{C}$  wurden durch eine Havarie  $65 \text{ mg}$  eines Insektizid eingetragen. Dessen Zerfallsrate (Reak. 1. Ord.) wurde mit  $1,62 \text{ a}^{-1}$  bestimmt.
  - a) Berechnen Sie die (Massen-)Konzentration (Masse pro Volumen) des Insektizids nach einem bzw. zwei Jahren!
  - b) Wie lange muss der See für Besucher gesperrt werden, bis die Konzentration den maximal zulässigen Wert von  $1,25 \cdot 10^{-7} \text{ mg/l}$  erreicht hat?
3. Ist eigentlich zweimal die Halbwert-Zeit die Gesamt-Zeit der Reaktion? Erklären Sie die Zusammenhänge so, dass ein chemischer Laie sie versteht!

## Reaktionsgeschwindigkeit einer Metall-Säure-Reaktion

### **Materialien / Geräte:**

einfaches Kalorimeter (optimal doppelwandiges Glas-Gefäß (Isolier-Becher / -Tasse) mit Styropor-Deckel); Gas-Entwickler (RG mit seitlichem Ansatz und Schlauch + Stopfen) mit angeschlossenen Kolbenprober oder pneumatischem Auffang (mit Standzylinder od. grob geeichten großem Reagenzglas); 50 ml verdünnte Salzsäure; Metall (Magnesium-Band od. Zink-Stück); Stop-Uhr

### **Durchführung / Ablauf:**

- Salzsäure in den Gas-Entwickler füllen
- Gas-Entwickler in ein halb mit Wasser (20 °C) befülltes Kalorimeter positionieren und den Gas-Auffang sicher stellen
- Metall-Stück in den Gas-Entwickler geben, sofort verschließen und Zeit-Messung starten
- notieren der Zeit, nachdem jeweils 10 ml Gas gebildet wurden

### **Auswertungen / Berechnungen:**

- Stellen Sie das gebildete Volumen gegen die Zeit graphisch dar!
- Berechnen Sie die gebildete Stoffmenge an Wasserstoff und daraus die verbrauchte Stoffmenge an Metall!

## Verfolgung einer Reaktion über den pH-Wert

### **Materialien / Geräte:**

Becherglas 100 ml; Rührgerät od. Glasstab; 200 mg Magnesium-Band od. -Späne; verdünnte Salzsäure 0,01 mol/l; konzentriertere Salzsäure; pH-Messgerät; Uhr

### **Durchführung / Ablauf:**

- Becherglas auf Rührgerät stellen und das Rührstäbchen (Rührfisch) hinzugeben
- wenn kein Rührgerät verfügbar ist, immer regelmäßig mit dem Glasstab umrühren
- 40 ml der verd. Salzsäure in das Becherglas geben
- pH-Elektrode so positionieren, dass es von dem Rührstäbchen / Glasstab nicht beschädigt wird
- ev. den pH-Wert mit der konzentrierteren Salzsäure auf knapp unter 2 bringen
- Magnesium-Stücke in das Becherglas geben und mit der Daten-Aufnahme beginnen, wenn der pH-Wert bei 2,0 liegt
- der pH-Wert wird nun alle 30 s gemessen, bis der Wert 3,0 erreicht wird

### **Auswertungen / Berechnungen:**

- der pH-Wert wird mit Hilfe der Formel  $c[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}}$  in die Konzentration der Wasserstoff-Ionen (Hydronium-Ionen) umgerechnet
- erstellen Sie ein Diagramm, in dem Sie den pH-Wert gegen die Zeit darstellen
- erstellen Sie ein weiteres Diagramm, in dem Sie die Wasserstoff-Ionen-Konzentration gegen die Zeit darstellen (achten Sie dabei auf vergleichbare x-Achsen)

### Aufgaben (zum Experiment / Spiel):

1. Lesen Sie sich die Beschreibung des Spiel's (Modell-Experiment's) durch!
2. Wie wird aus Ihrer Sicht ein abgeleitetes Diagramm aussehen, in dem für die Spielzüge (Takte) die Anzahlen der Erbsen A, B, C und D dargestellt werden?
3. Skizzieren Sie ein passendes Diagramm und begründen Sie die vermutete Kurven-Form! (Sollten mehrere Möglichkeiten bestehen (z.B. Schwankungen od.ä.), dann kennzeichnen Sie das in der Skizze durch mehrere dünnere Kurven oder einen schattierten Bereich.)
4. Führen Sie das Modell-Experiment / Spiel einmal durch!
5. Erstellen Sie ein passendes Diagramm auf Millimeter-Papier!
6. Erklären Sie den Verlauf Ihrer Kurve!
7. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit denen anderer Kurs-Teilnehmer / Team's!

### **Modell-Experiment / Spiel: Erbsen-Quartet**

Benötigt werden:

- 50 gelbe Erbsen → A; 50 grüne Erbsen → B
- 50 rote Erbsen → C; 50 blaue Erbsen → D
- (alternativ: unterschiedlich gefärbte Kugeln, Bohnen gleicher Größe)
- hoher undurchsichtiger Becher oder Becherglas mit Papier-Umrandung (als Sichtschutz) oder ähnliches als (Stochastik-)„Urne“
- Würfel

**Ablauf:**

1. Befüllen der Urne mit den gelben und grünen Erbsen
2. Festlegen der Anzahl der Ziehungen (Spielzüge) (z.B. 50 (besser 100)) → Takte
3. Festlegen des minimalen Punktwertes auf dem Würfel (z.B. 5) → Zielwert
4. Ziehen von 2 Erbsen aus der Urne
5. WENN eine Erbse grün und die andere gelb ist, DANN weiter bei 5a, SONST weiter bei 6.
  - a. einmal Würfeln
  - b. WENN Würfelwert größer od. gleich ist wie der festgelegte Zielwert, DANN Austausch der Erbsen durch eine rote und eine blaue
6. ev. Veränderung und neue Anzahlen (für jede Ziehung (jeden Spielzug, Takt)) notieren
7. weiter bei 4. bis Anzahl gewünschte Ziehungen erreicht ist

### für die gehobene Anspruchsebene:

8. Setzen Sie das Modell-Experiment in eine Tabellenkalkulation um (siehe z.B. Abb. nächste Seite) und lassen Sie sich ein passendes Diagramm erstellen!

|    | A                                                           | B                                                           | C               | D               | E               | F              | G              | H                      | I                          | J                        | K              | L | M |
|----|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------|---|---|
| 1  | <b>Modell-Experiment Erbsen (stochastisch, spielerisch)</b> |                                                             |                 |                 |                 |                |                |                        |                            |                          |                |   |   |
| 2  |                                                             |                                                             |                 |                 |                 |                |                |                        | <b>A + B ---&gt; C + D</b> |                          |                |   |   |
| 3  |                                                             |                                                             |                 |                 |                 |                |                |                        |                            |                          |                |   |   |
| 4  | <b>Ablauf</b>                                               | 1. 2 Erbsen zufällig wählen (aus undurchsichtiger Urne)     |                 |                 |                 |                |                |                        |                            |                          |                |   |   |
| 5  |                                                             | 2. erwürfeln einer Energie                                  |                 |                 |                 |                |                |                        |                            |                          |                |   |   |
| 6  |                                                             | 3. bewerten der Erbsen (richtig (2x A) und mindestens notw. |                 |                 |                 |                |                |                        |                            |                          |                |   |   |
| 7  |                                                             | EA (Aktivierungs-Energie)), dann Austausch gegen 2x B       |                 |                 |                 |                |                |                        |                            |                          |                |   |   |
| 8  |                                                             |                                                             |                 |                 |                 |                |                |                        |                            |                          |                |   |   |
| 9  |                                                             | Start                                                       |                 |                 |                 |                |                |                        |                            |                          | min EA (1-->6) |   |   |
| 10 |                                                             | 30                                                          | 30              | 0               | 0               |                |                |                        |                            |                          |                | 3 |   |
| 11 |                                                             |                                                             |                 |                 |                 |                |                |                        |                            |                          |                |   |   |
| 12 | <b>Takt</b>                                                 | <b>Erbsen A</b>                                             | <b>Erbsen B</b> | <b>Erbsen C</b> | <b>Erbsen D</b> | <b>Zufall1</b> | <b>Zufall2</b> | <b>gezogene Erbse1</b> | <b>gezogene Erbse2</b>     | <b>erwürfelte Energ.</b> | <b>Umsatz</b>  |   |   |
| 13 | 0                                                           | 30                                                          | 30              | 0               | 0               | 11             | 24             | A                      | A                          | 3                        | 0              |   |   |
| 14 | 1                                                           | 30                                                          | 30              | 0               | 0               | 9              | 7              | A                      | A                          | 4                        | 0              |   |   |
| 15 | 2                                                           | 30                                                          | 30              | 0               | 0               | 10             | 29             | A                      | A                          | 6                        | 0              |   |   |
| 16 | 3                                                           | 30                                                          | 30              | 0               | 0               | 27             | 14             | A                      | A                          | 5                        | 0              |   |   |
| 17 | 4                                                           | 30                                                          | 30              | 0               | 0               | 42             | 21             | B                      | A                          | 4                        | 1              |   |   |
| 18 | 5                                                           | 29                                                          | 29              | 1               | 1               | 30             | 59             | B                      | C                          | 1                        | 0              |   |   |
| 19 | 6                                                           | 29                                                          | 29              | 1               | 1               | 23             | 41             | A                      | B                          | 4                        | 1              |   |   |
| 20 | 7                                                           | 28                                                          | 28              | 2               | 2               | 37             | 47             | B                      | B                          | 3                        | 0              |   |   |
| 21 | 8                                                           | 28                                                          | 28              | 2               | 2               | 44             | 41             | B                      | B                          | 1                        | 0              |   |   |
| 22 | 9                                                           | 28                                                          | 28              | 2               | 2               | 17             | 16             | A                      | A                          | 1                        | 0              |   |   |
| 23 | 10                                                          | 28                                                          | 28              | 2               | 2               | 52             | 31             | B                      | B                          | 4                        | 0              |   |   |
| 24 | 11                                                          | 28                                                          | 28              | 2               | 2               | 13             | 5              | A                      | A                          | 3                        | 0              |   |   |
| 25 | 12                                                          | 28                                                          | 28              | 2               | 2               | 16             | 23             | A                      | A                          | 5                        | 0              |   |   |
| 26 | 13                                                          | 28                                                          | 28              | 2               | 2               | 38             | 56             | B                      | B                          | 2                        | 0              |   |   |
| 27 | 14                                                          | 28                                                          | 28              | 2               | 2               | 58             | 16             | C                      | A                          | 6                        | 0              |   |   |
| 28 | 15                                                          | 28                                                          | 28              | 2               | 2               | 47             | 10             | B                      | A                          | 6                        | 1              |   |   |

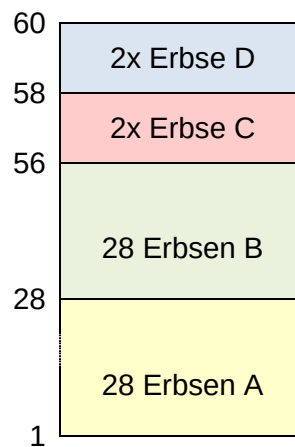
Ausschnitt (Anfang) einer Simulation mit einer Tabellenkalkulation

### Hinweis zu meiner Lösung zur Ermittlung der "gewürfelten" Erbse:

Ich habe mir die Erbsen (aus der Urne) immer als sortierten Stapel vorgestellt. Zu Anfang sind also unten die 30 Erbsen A (z.B. gelbe) und darüber die 30 Erbsen B (z.B. grüne) angeordnet. Jetzt werden zwei Zufallszahlen gewürfelt, die zwischen 1 und der Gesamtanzahl von Erbsen liegen. Dann werden die jeweils erwürfelten Erbsen aus dem Stapel entnommen.

Je weiter die Simulation fortgeschritten ist, umso mehr ändern sich die Entscheidungs-Grenzen für die verschiedenen Erbsen. Bei Takt 14 habe ich unten 28 gelbe, dann 28 grüne, gefolgt von je 2 Erbsen C und D. Die Zufallszahl 1 (hier: 58) bewirkt nun dass es eine "Erbse C" wird.

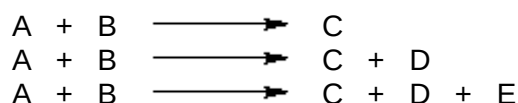
In der Tabellenkalkulation braucht man dann z.B. für "gezogene Erbse 1" drei geschachtelte WENN()-Funktionen.



Erbsenstapel  
Situation bei Takt 14

## Reaktion 2. Ordnung

Reaktionen 2. Ordnung sind bimolekulare Reaktionen. Sie stellen den häufigsten Fall in der Chemie dar. Mögliche Reaktions-Schemata sind z.B.:

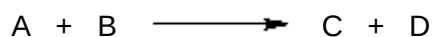


Die Reaktions-Geschwindigkeit ist von den Konzentrationen beider Ausgangs-Stoffe abhängig.

$$\begin{array}{lll} RG = f(c_A, c_B) & \text{od. nur für A: } RG = f(c_A) & \text{bzw. nur für B: } RG = f(c_B) \\ RG = k \cdot c_A \cdot c_B & RG = k \cdot c_A^2 & RG = k \cdot c_B^2 \end{array}$$

Bei Reaktionen mit mehr als zwei Reaktions-Partnern ermittelt man häufig eine Reaktion 2. Ordnung. Hier dominiert meist ein Einzel-Schritt ( $\rightarrow$  Elementar-Reaktion) den gesamten Reaktions-Verlauf. Meß-technisch wird dann genau diese Elementar-Reaktion primär erfasst (s.a. weiter vorn). Die anderen Reaktionen sind üblicherweise so schnell, dass sie das Geschehen kaum beeinflussen.

Die Gleichung für das Massenwirkungs-Gesetz kann für die klassische Muster-Reaktion:



wie üblich aufgestellt werden:

$$K_c = \frac{c[C] \cdot c[D]}{c[A] \cdot c[B]}$$

Geht man von gleichen Stoffmengen für die Ausgangsstoffe aus, dann kann auf:

$$K_c = \frac{c[C]^2}{c[A]^2}$$

vereinfacht werden. Der Stoff A kann gegen B und / oder C gegen D ausgetauscht werden. Die Momentan-Geschwindigkeit ist damit:

$$-\frac{d c_{AS}}{d t} = k c_{AS}^2$$

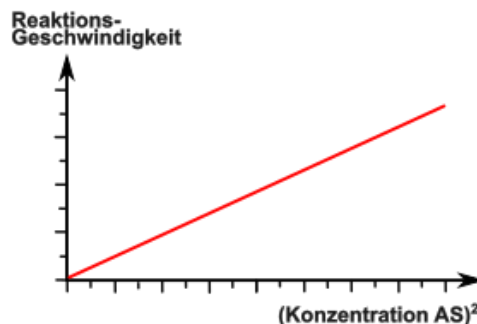
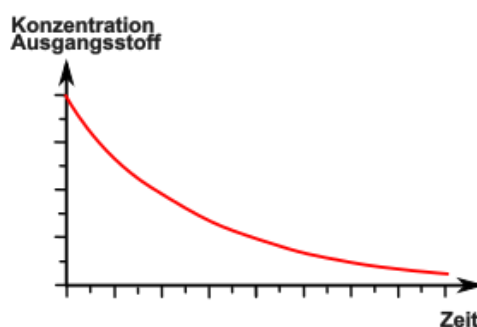
Dies bezeichnen wir auch als **Zeitgesetz 2. Ordnung**.

Die Reaktions-Geschwindigkeit und das Quadrat der Konzentration eines Reaktanten bzw. dem Produkt beider Reaktanten verhalten sich proportional zueinander.

Das Integrieren bringt uns:

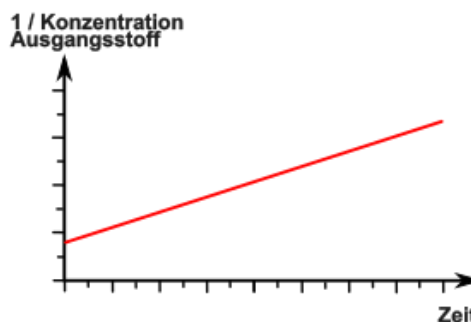
$$\frac{1}{c_A} - \frac{1}{c_0} = k \cdot t$$

als integriertes Zeit-Gesetz für Reaktionen 2. Ordnung.



Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Zeit und dem Reziproken der Konzentration eines Reaktanten:

$$\frac{1}{c_0} = -k \cdot t + \frac{1}{c_A}$$

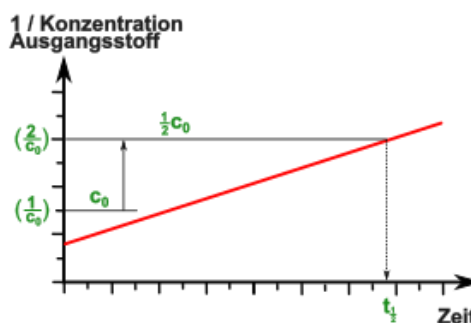


Die Halbwerts-Zeit leiten wir ebenfalls über die Ausgangs-Konzentration  $c_0$  und ihren halbierten Wert (die aktuelle Konzentration  $c_A$ ) ab:

also:  $c_A = \frac{c_0}{2}$

$$\frac{2}{k \cdot c_0} - \frac{1}{k \cdot c_0} = t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \tau = \frac{1}{k \cdot c_0}$$



Stellt man die Veränderung der Konzentration in der Zeit mit reziproken Konzentrationen dar, dann liegt die halbe Ausgangs-Konzentration über der Ausgangs-Konzentration.

Die bisher gemachten Aussagen gingen immer mehr oder weniger stillschweigend davon aus, dass die Ausgangsstoffe in gleichen Konzentrationen vorliegen. In der Produktion versucht man aber durch den Überschuss des – billigeren oder leichter verfügbaren – Ausgangsstoffes die Ausbeute zu verbessern. Alle Teilchen des anderen Reaktions-Partner haben dadurch eine deutlich bessere Reaktions-Chance.

Damit kommen wir in die Situation, dass die Konzentration des vermehrt eingesetzten Stoffes praktisch während der Reaktion konstant bleibt. Der verbrauchte Stoff wird immer wieder nachgeliefert. Somit ist die Reaktions-Geschwindigkeit nur noch von der Konzentration des geringer konzentrierten Stoffes abhängig. Aus einer Reaktion 2. Ordnung wird so scheinbar eine 1. Ordnung. Um den sachlichen Unterschied klar zu machen – es bleibt natürlich eine bimolekulare Reaktion – aber sie erscheint als monomolekular. Man spricht dann auch von einer Reaktion Pseudo-1. Ordnung. Für die Berechnungen oder die graphische Darstellung in Diagrammen muss man dann auf die Erkenntnisse zu den Reaktionen 1. Ordnung zurückgreifen.

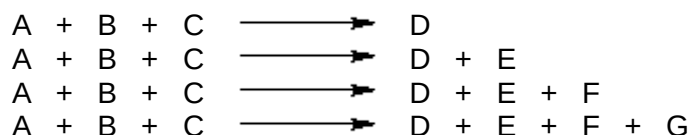
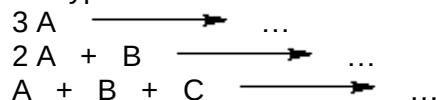


### Reaktion 3. Ordnung



trimolekulare Reaktion  
sehr selten

Grundtypen:



$$\begin{aligned} RG &= f(c_A, c_B, c_C) \\ RG &= k \cdot c_A \cdot c_B \cdot c_C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{od. } RG &= f(c_A) \\ RG &= k \cdot c_A^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{bzw. für B: } RG &= f(c_B) \\ RG &= k \cdot c_B^3 \end{aligned}$$

aber auch möglich

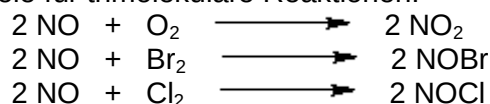
$$\begin{aligned} RG &= f(c_A, c_B) \\ RG &= k \cdot c_A^2 \cdot c_B \end{aligned} \quad \text{od.} \quad \begin{aligned} RG &= f(c_A, c_B) \\ RG &= k \cdot c_A \cdot c_B^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} RG &= f(c_A, c_C) \\ RG &= k \cdot c_A^2 \cdot c_C \end{aligned} \quad \text{od.} \quad \begin{aligned} RG &= f(c_A, c_C) \\ RG &= k \cdot c_A \cdot c_C^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} RG &= f(c_B, c_C) \\ RG &= k \cdot c_B^2 \cdot c_C \end{aligned} \quad \text{od.} \quad \begin{aligned} RG &= f(c_B, c_C) \\ RG &= k \cdot c_B \cdot c_C^2 \end{aligned}$$

Reaktions-Geschwindigkeit ist von den Konzentrationen aller drei Ausgangs-Stoffe abhängig.

Beispiele für trimolekulare Reaktionen:



### Reaktionen höherer Ordnung

praktisch kaum möglich, meist verstecken sich dahinter mehrschrittige Reaktionen, die u.U. noch nicht zerlegbar sind bzw. zeitlich so "ungünstig" ablaufen, dass sie schlecht in ihren Abläufen nachvollziehbar bzw. beobachtbar sind

z.B. bei der Kombination einer sehr langsamen mit einer sehr schnellen Teil-Reaktion wenn die langsame Reaktion dann mal wirklich abgelaufen ist, schließt sich unmittelbar sofort die schnelle an, das Zwischen-Produkt der sehr langsamen Reaktion ist nicht erfassbar, weil es von der sehr schnellen – praktisch sofort – weiter umgesetzt wird

---

Als Analogie-Modell für eine Folge-Reaktion kann man sich die Reihen-Schaltung von Widerständen vorstellen. In der Reihen-Schaltung bestimmt der größte Widerstand den Gesamt-Widerstand. Auf die Folge-Reaktion betrachtet heißt dies, dass die langsamste Reaktion die Gesamt-Geschwindigkeit bestimmt.

Das Gegenstück zur Folge-Reaktion wäre die Parallel-Reaktion. Als Analogie kann man nun die Parallel-Schaltung von Widerständen nutzen. In einem solchen Strom-Kreislauf bestimmt der kleinste Widerstand den Gesamt-Widerstand. D.h. die schnellste Reaktion bestimmt den Verlauf der Reaktionen.

## Bestimmung der Reaktions-Ordnung



allgemein gilt:

$$RG = - \frac{d c_{AS}}{d t} = k c_{AS}^n \quad n \dots \text{Reaktionsordnung}$$

$$\frac{1}{c_A^{n-1}} - \frac{1}{c_0^{n-1}} = (n-1)k \cdot t$$

für die Reaktion 1. Ordnung haben wir den folgenden Zusammenhang gefunden:

$$\ln c_t[A] = -k_A \cdot t + \ln c_0 [A]$$

$$y = m x + n$$

Die Entsprechung in einer linearen Funktion sehen wir darunter. Diese ermöglicht es uns, die Geschwindigkeit-Konstante recht einfach zu ermitteln.

Der entsprechende Zusammenhang für eine Reaktion 2. Ordnung gilt:

$$\frac{1}{c_A} = k \cdot t + \frac{1}{c_0}$$

$$y = m x + n$$

Liegen nun z.B. Messwerte (Zeit  $t$  und Konzentration  $c_t$ ) eines Versuches vor, dann können wir sehr effektiv die vorliegende Ordnung bestimmen, in dem wir nach dem besten linearen Zusammenhang suchen. Dazu kann man sehr gut Tabellenkalkulations-Programme – wie EXCEL oder CALC benutzen.

| t | c <sub>t</sub> |
|---|----------------|
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |
|   |                |

Bei ihnen lassen sich sehr einfach Diagramme aus den Daten erzeugen. Besteht dieser zum natürlichen Logarithmus der Konzentration, dann ist es eine Reaktion 1. Ordnung.

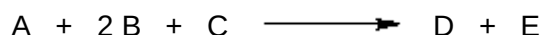
Ergibt sich dagegen eine Gerade mit dem Reziproken der Konzentrationen, dann ist es eine Reaktion 2. Ordnung.

Das Verfahren lässt sich für andere Reaktions-Ordnungen fortsetzen. Bei einer eventuell vorliegenden 3. Ordnung müsste mit dem Reziproken der Quadrate der Konzentrationen ein linearer Zusammenhang bestehen.

| t | c <sub>t</sub> |  | ln c <sub>t</sub> | 1 / c <sub>t</sub> |
|---|----------------|--|-------------------|--------------------|
|   |                |  |                   |                    |
|   |                |  |                   |                    |
|   |                |  |                   |                    |
|   |                |  |                   |                    |
|   |                |  |                   |                    |

### Aufgaben:

#### 1. Berechnen Sie die Geschwindigkeits-Konstante für die Reaktion:



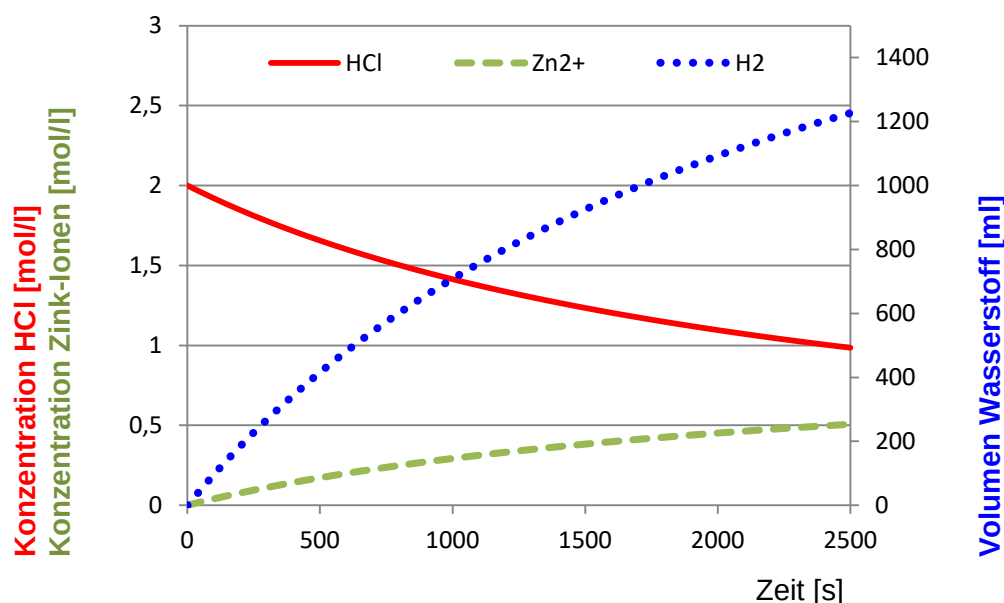
Am Messpunkt hat man die Konzentrationen für A mit 0,32 mol/l, für B mit 0,738 mol/l und für C mit 0,55 mol/l bestimmt.

#### 2. Bei rund 500 K zerfällt Stickstoffdioxid in Stickstoffmonoxid und Sauerstoff. Dabei wurden die folgenden Werte aufgenommen:

| Zeit [s]                              | 0      | 50     | 100    | 150    | 200    | 250    | 300    |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Konzentration NO <sub>2</sub> [mol/l] | 0,0200 | 0,0157 | 0,0130 | 0,0119 | 0,0096 | 0,0090 | 0,0076 |

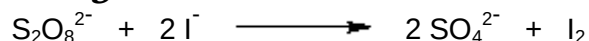
- Stellen Sie die Reaktions-Gleichung auf!
- Stellen Sie begründete Voraussagen zur Reaktions-Ordnung und der Freiwilligkeit der Reaktion auf!
- Berechnen Sie die GIBBS-Enthalpie und setzen Sie diese zu Ihrer Vermutung zur Freiwilligkeit in Beziehung!
- Ist die Reaktion eigentlich endo- oder exotherm? Begründen Sie!
- Übernehmen Sie die obigen Werte in eine Tabellenkalkulation und stellen Sie diese graphisch dar!
- Ermitteln Sie rechnerisch oder graphisch oder über die Tabellenkalkulation welche Ordnung die Reaktion hat! Vergleichen Sie dann mit Ihrer Voraussage!
- Berechnen Sie die Konzentration aller Gase nach 500 s Reaktionszeit!

#### 3. Interpretieren Sie das folgende Diagramm!



#### 4. Bestimmen Sie die "Reaktions-Ordnung" für das "Modell-Experiment zum Verlauf einer chemischen Reaktion" (Hebe-Modell)!

5. Für die Reaktion von Peroxidisulfat-Ionen mit Iodid-Ionen gilt die folgende Gleichung:



In Versuchen wurden verschiedene Konzentrationen zur Reaktion gebracht und die reele Reaktionsgeschwindigkeit bestimmt (siehe Tabelle).

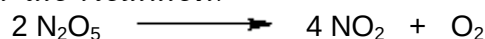
a) Stellen Sie das Geschwindigkeits-Gesetz für diese Reaktion auf!

b) Können Sie aus den Daten entnehmen, welche Ordnung der Reaktion hier vorliegt? Begründen Sie!

c) Berechnen Sie die Geschwindigkeits-Konstante k!

| c [S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>2-</sup> ]<br>in mol/l | c [I <sup>-</sup> ]<br>in mol/l | RG<br>in mol/l*s     |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 0,0001                                                       | 0,010                           | 3,9*10 <sup>-5</sup> |
| 0,0002                                                       | 0,010                           | 7,8*10 <sup>-5</sup> |
| 0,0002                                                       | 0,005                           | 3,9*10 <sup>-5</sup> |

6. Für die Reaktion:



wurden bei 70 °C zu verschiedenen Ausgangs-Konzentrationen die Anfangs-Geschwindigkeiten bestimmt.

a) Entscheiden Sie, ob es sich hierbei um eine Reaktion 1. oder 2. Ordnung handelt! Begründen Sie!

b) Stellen Sie das Geschwindigkeits-Gesetz für diese Reaktion auf!

c) Bestimmen Sie die zu erwartende Reaktions-Geschwindigkeit für eine Ausgangs-Konzentration von 0,05 mol/l!

| c <sub>0</sub> [N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]<br>in mol/l | RG<br>in mol/l*s      |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 0,18                                                        | 1,61*10 <sup>-3</sup> |
| 0,12                                                        | 1,09*10 <sup>-3</sup> |
| 0,08                                                        | 0,71*10 <sup>-3</sup> |
| 0,03                                                        | 0,27*10 <sup>-3</sup> |
| 0,01                                                        | 0,09*10 <sup>-3</sup> |

7. Bestimmen Sie für die Reaktionen die Reaktions-Ordnung mit Hilfe der kinetischen Messdaten! Stellen Sie dazu auch jeweils eine Reaktions-Gleichung auf und erläutern Sie aus dieser heraus, die zu erwartende Reaktions-Ordnung! Stimmen die Aussagen der Erwartung mit den Messdaten überein?

a) Zersetzung von Stickstoffdioxid (zu Stickstoffmonoxid und Sauerstoff in der Gasphase bei 300 °C)

|                              |      |      |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| t [min]                      | 0    | 50   | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| c[NO <sub>2</sub> ] [mmol/l] | 15,0 | 11,9 | 9,7 | 8,4 | 7,2 | 5,7 | 4,6 | 4,2 |

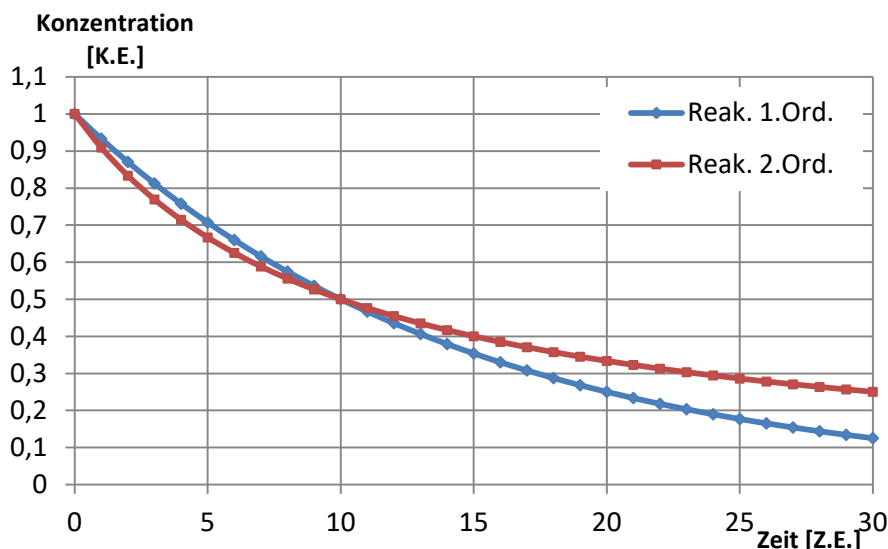
b) Verseifung eines Esters mit Natronlauge (zu Alkansäure und Alkanol)

|                              |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| t [min]                      | 0    | 5    | 10   | 15  | 20  | 25  | 30  | 40  | 60  |
| c[OH <sup>-</sup> ] [mmol/l] | 15,0 | 12,3 | 10,4 | 8,9 | 7,8 | 7,0 | 6,3 | 5,3 | 4,1 |

8.

9. In einer Computer-Simulation wurden zwei Reaktionen gegenübergestellt. Reaktion 1 ist eine Reaktion 1. Ordnung nach dem Schema:  $A \longrightarrow B$ . In der Simulation wurde  $k = 0,0963 \text{ Z.E.}^{-1}$  benutzt. Für die Reaktion verwendete man  $k = 0,1 \text{ K.E.}^{-1} \cdot \text{Z.E.}^{-1}$ . Das angenommene Reaktions-Schema soll:  $A \longrightarrow B$  lauten.

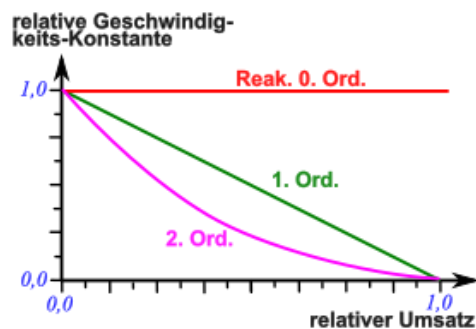
Die Simulation erzeugte die im Diagramm dargestellten Daten.



- a) Interpretieren Sie das Diagramm! Betrachten Sie zuerst die Reaktionen einzeln und dann im Vergleich!
- b) Bestimmen Sie die Halbwertszeit  $\tau$  der 1. Reaktion!
- c) Zeigen Sie für die 1. Reaktion, dass die Halbwertszeit Konzentrations-unabhängig ist!
- d) Prüfen Sie, ob dies auch für die Reaktion 2. Ordnung gilt!
10. Für die Zersetzung von Harnstoff (in Hexanol): fanden PEE und JUNGERS die folgenden Geschwindigkeits-Konstanten:

| $\vartheta [^{\circ}\text{C}]$ | 131,5                | 139,5                | 147,5                 | 160,5                |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| $k [\text{min}^{-1}]$          | $2,44 \cdot 10^{-3}$ | $5,00 \cdot 10^{-3}$ | $10,52 \cdot 10^{-3}$ | $31,5 \cdot 10^{-3}$ |

- a) Übernehmen Sie die (horizontale) Tabelle in vertikaler Form in Ihre Unterlagen! Erweitern Sie die Tabelle um die Spalten " $T [\text{K}]$ ", " $1/T [1/\text{K}]$ " und " $\ln k$ "! Berechnen Sie die fehlenden Werte!
- b) Zeichnen Sie ein Diagramm, in dem Sie die reziproke KELVIN-Temperatur gegen den natürlichen Logarithmus der Geschwindigkeits-Konstanten darstellen!
- c) Legen Sie eine Gerade durch die Daten-Punkte und ermitteln Sie graphisch die Steigung der Geraden!
- d) Berechnen Sie die exakten Anstiege zwischen den Daten-Punkten und Mitteln Sie diese! Vergleichen Sie den berechneten Wert mit dem graphisch ermittelten!
- e) Berechnen Sie die Aktivierungs-Energie der Reaktion mittels ARRHENIUS-Gleichung!
- für das gehobene Anspruchsniveau:
11. Bearbeiten Sie die Aufg. 10 vollständig mit Hilfe einer Tabellenkalkulation!



### Halbwertszeiten von Reaktionen:

Anfangs-Konzentration  $c_0 = 0,1 \text{ mol / l}$

| Reaktion                                                                                                                   | Temperatur [K] | Halbwertszeit                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------|
| $\text{H}^+ + \text{OH}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$                                                              | 298            | $6,7 \cdot 10^{-11} \text{ s}$ |
| $2 \text{ I} \longrightarrow \text{I}_2$                                                                                   | 296            | $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ s}$  |
| $2 \text{ N}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{ N}_2 + \text{O}_2$                                                         | 1000           | 0,9 s                          |
| $2 \text{ NO}_2 \longrightarrow 2 \text{ NO} + \text{O}_2$                                                                 | 573            | 18,5 s                         |
| $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 + \text{OH}^- \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ | 293            | 9,2 min                        |
| Cyclopropan $\longrightarrow$ Propan                                                                                       | 773            | 16,6 min                       |
| $2 \text{ N}_2\text{O}_5 \longrightarrow 4 \text{ NO}_2 + \text{O}_2$                                                      | 298            | 6,1 h                          |
| $\text{CH}_3\text{Br} + \text{OH}^- \longrightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{Br}^-$                                    | 298            | 9,9 h                          |
| $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{ C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$        | 290            | 3,7 h                          |
| $\text{H}_2 + \text{I}_2 \longrightarrow 2 \text{ HI}$                                                                     | 500            | 269 d                          |
|                                                                                                                            | 600            | 6,3 h                          |
|                                                                                                                            | 700            | 2,6 min                        |
|                                                                                                                            | 800            | 3,8 s                          |

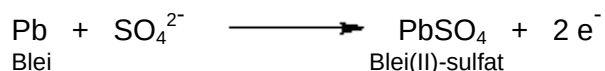
| Ord. | allg. Schema<br>Geschwindigkeits-Gesetz                                       | Zeitgesetz                           | integrierte Form                                             | Halbwertszeit                                        | Einheit<br>von k                         | linearer Zusammen-<br>hang zw. ... |
|------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|
| 0    | $A \longrightarrow B (+ C)$                                                   | $-\frac{d c_{AS}}{d t} = k$          | $c_0 - c = k \cdot t$                                        | $\tau = \frac{c_0}{2 k}$                             | mol / s                                  | (c = const und t)                  |
| 1    | $A \longrightarrow B (+ C)$<br>$RG = k \cdot c_A$                             | $-\frac{d c_{AS}}{d t} = k c_{AS}$   | $c = c_0 \cdot e^{-k \cdot t}$<br>$\ln c = \ln c_0 - k t$    | $\tau = \frac{\ln 2}{k}$<br>$\tau = \frac{0,963}{k}$ | 1 / s                                    | ln c und t                         |
| 2    | $A + B \longrightarrow C (+ D)$<br>$RG = k \cdot c_A \cdot c_B$               | $-\frac{d c_{AS}}{d t} = k c_{AS}^2$ | $\frac{1}{c_A} - \frac{1}{c_0} = k \cdot t$                  | $\tau = \frac{1}{k \cdot c_0}$                       | l / (mol s)                              | 1/c und t                          |
| 3    | $A + B + C \longrightarrow D (+ E)$<br>$RG = k \cdot c_A \cdot c_B \cdot c_C$ | $-\frac{d c_{AS}}{d t} = k c_{AS}^3$ | $\frac{1}{c_A^2} - \frac{1}{c_0^2} = 2k \cdot t$             | $\tau = \frac{3}{2 k \cdot c_0^2}$                   | l <sup>2</sup> / (mol <sup>2</sup> s)    | 1/c <sup>2</sup> und t             |
|      |                                                                               |                                      |                                                              |                                                      |                                          |                                    |
| n    | nur theoretisch                                                               | $-\frac{d c_{AS}}{d t} = k c_{AS}^n$ | $\frac{1}{c_A^{n-1}} - \frac{1}{c_0^{n-1}} = (n-1)k \cdot t$ | $\tau = \frac{2^{n-1} - 1}{(n-1) k \cdot c_0^{n-1}}$ | l <sup>n-1</sup> /(mol <sup>n-1</sup> s) | 1/c <sup>n-1</sup> und t           |



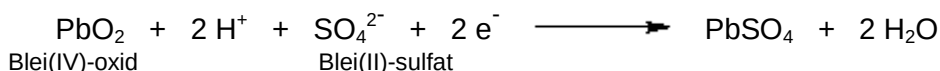
## Umkehrbarkeit chemischer Reaktionen



Von Akkumulatoren wissen wir, dass man sie recht häufig laden und entladen lassen kann. Nehmen wir den klassischen Blei-Akkumulator. Er besteht aus einer Blei- und einer Blei(IV)-oxid-Elektrode, die in Schwefelsäure eingetaucht sind. Am negativen Pol läuft beim Entladen die folgende chemische Reaktion ab:



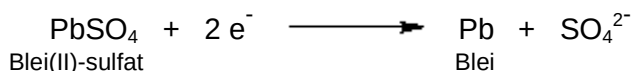
Die freigesetzten Elektronen bilden den Strom, der zum Plus-Pol fließen kann. Dort passiert dann gleichzeitig:



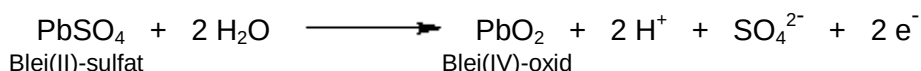
Wenn der Akku entladen ist, überwiegt das Blei(II)-sulfat. Es ist als schwer lösliches Salz zwischen den Elektroden abgelagert.

Die Reaktionen sind exergon. Der Akku liefert uns Energie. Im klassischen Auto mit Verbrennungs-Motor wird der Anlasser, das Autoradio und die Beleuchtung damit betrieben. Eine einzelne Zelle im Akku liefert eine Spannung von 2 V. Um auf die üblichen 12 V zu kommen, werden einfach 6 Zellen in Reihe geschaltet.

Der entscheidende Vorteil von Akkumulatoren liegt nun darin, dass nach dem Entladen das System nicht entsorgt werden muss, sondern durch Energie-Zufuhr wieder in den Ausgangszustand zurückversetzt werden kann. Der Vorgang läuft nur durch äußere Energie-Zufuhr über das Ladegerät. Der Vorgang ist also endergon. Chemisch laufen die oben aufgezeigten Reaktionen genau entgegengesetzt ab. Am Minus-Pol (des Akku's) wird Blei(II)-sulfat nun wieder zu Blei zurückgewandelt:



Gleichzeitig läuft am Plus-Pol die Umsetzung vom Blei(II)-sulfat zu Blei(IV)-oxid:

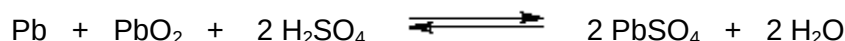


Entlade- und Lade-Vorgang laufen zeitlich versetzt ab.

Um die Vorgänge etwas übersichtlicher darzustellen, fassen wir zuerst einmal die Elektroden-Reaktionen zu einer Gleichung zusammen:

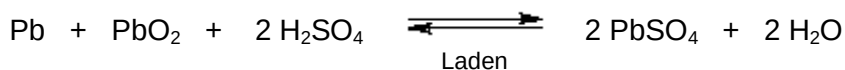


Beide Gleichungen lassen sich durch umkehren der einen praktisch gleichsetzen:



Die Kombination der beiden Reaktions-Pfeile ergibt ein neues chemisches Symbol – den **Doppel-Pfeil**. Um die zeitliche Versetzung zu kennzeichnen, darf man über bzw. unter den Pfeilen Notizen machen:

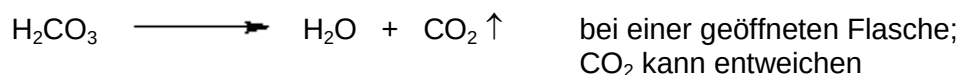
Entladen



Man kann nun die Reaktionen auch nach der Richtung unterscheiden. Die Reaktion von links nach rechts wird als **Hin-Reaktion** genannt. Die entgegengesetzte Reaktion (von rechts nach links) ist die **Rück-Reaktion**.

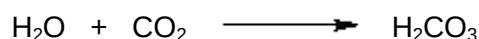
Reaktionen, die sowohl in die eine, aber auch in die entgegengesetzte Richtung laufen können, werden umkehrbare Reaktionen genannt. Welche Richtung gerade eingeschlagen ist, wird durch die aktuellen Bedingungen bestimmt. Das Entladen läuft freiwillig ab. Das Laden – als endergoner Prozess – muss eben durch das Ladegerät erzwungen werden.

Ein weiteres Beispiel kommt aus dem Haushalt. Jeder kennt den Effekt, wenn man eine Sprudel- / Selter-Flasche nicht ganz dicht zudreht. Schon nach wenigen Stunden / Tagen ist die Kohlensäure raus:



Dieser Vorgang ist freiwillig (exergon). Mit steigender Temperatur wird er deutlich beschleunigt.

Aber wie entsteht die Kohlensäure? Die Getränke-Hersteller pressen unter hohem Druck Kohlenstoffdioxid in das Wasser. Das Gas löst sowohl physikalisch als auch chemisch. Im letzteren Fall entsteht die schwache Kohlensäure:

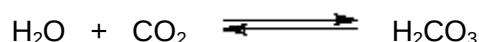


Sie kann dissoziieren und dabei eben Hydronium- und Carbonat-Ionen bilden:



In dieser Reaktions-Gleichung sehen wir schon einen Doppel-Pfeil, der uns die Dissoziation anzeigen soll. Scheinbar ist auch diese Reaktion umkehrbar.

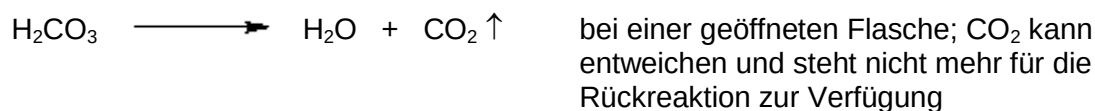
Aber kehren wir zur ursprünglichen Reaktion von Kohlenstoffdioxid, Wasser zu Kohlensäure zurück. Auch hier können wir beide Reaktion (Begasen und Entgasen) in einer Reaktions-Gleichung notieren:



Wenn die Reaktion allerdings, wie oben angegeben, in einem offenen System ablaufen, dann verschwindet das Kohlenstoffdioxid aus dem Reaktions-Bereich. Dadurch wird die Reaktion nicht mehr direkt umkehrbar sein.

Mit Ausnahme photochemischer und radioaktiver Vorgänge sind die meisten chemischen Reaktionen umkehrbar.

es kann aber sein, dass die Rück-Reaktion so selten oder so energetisch ungünstig abläuft, dass diese dann nicht mehr beobachtbar ist; auch sterische Sachverhalte können gegen eine Rück-Reaktion sprechen, z.B. wenn ein Reaktions-Produkt aus dem Reaktions-Gefäß entweichen kann (z.B. ein gebildetes Gas), dann steht es u.U. nicht mehr für die Rück-Reaktion zur Verfügung



### 5.3.1.2. Abhängigkeit der Reaktions-Geschwindigkeit gerichteter Reaktionen



Gerichtete Reaktion – also Reaktionen ohne Rück-Reaktion – sind ein theoretisches Gebilde. Bis auf wenige Reaktion (z.B. photo-chemische Vorgänge) sind alle Reaktionen umkehrbar, d.h. es gibt auch eine Rück-Reaktion. In vielen Fällen spielt die Rück-Reaktion aber einfach keine Rolle – es scheint so, als wäre die Reaktion gerichtet. In den folgenden Betrachtungen gehen wir zuerst einmal von gerichteten Reaktionen aus, um uns die Grundzusammenhänge zu gegenwärtigen. Mit diesen Erkenntnisse können wir uns dann an die chemischen Gleichgewichte machen (→ [5.3.2. das chemische Gleichgewicht](#) bzw. [5.3.2.x. Abhängigkeit und Beeinflussung des chemischen Gleichgewichtes](#)).

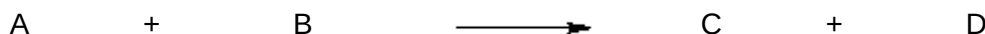
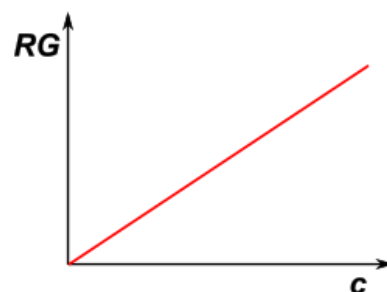
#### Konzentrations-Abhängigkeit

Zum Klären des Einflusses der Konzentration auf den Reaktions-Ablauf haben wir schon verschiedene Aspekte kennengelernt. Die Stoß-Theorie hat uns gezeigt, dass die Teilchen-Anzahl und das Verhältnis der Teilchen zueinander die Häufigkeit der effektiven Stöße beeinflusst. Diese Häufigkeit hat einen direkten Einfluss auf die Reaktions-Geschwindigkeit.

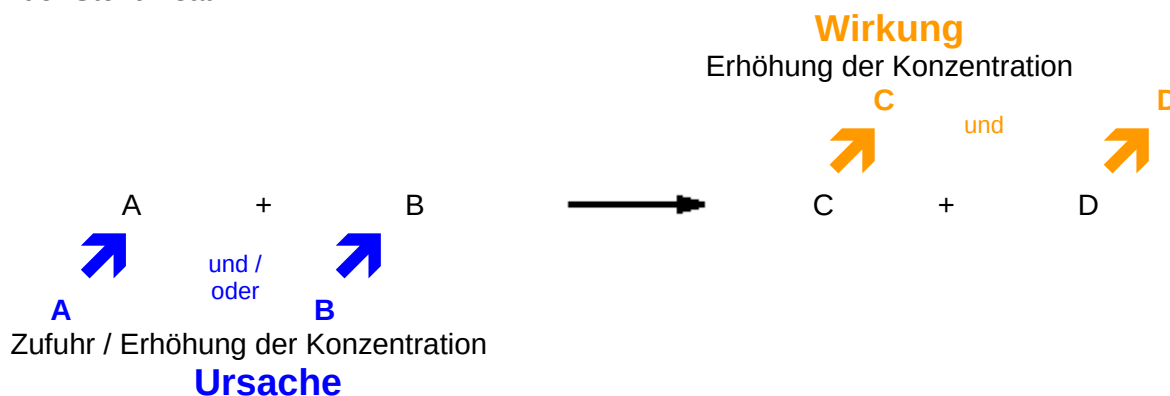
Deren Berechnung wiederum stellt ja auch einen proportionalen Zusammenhang von effektiven Stoff-Kontakten in einer Zeit-Einheit her:

$$RG = \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad \Delta c = c_2 - c_1 = \frac{n_2}{V} - \frac{n_1}{V}$$

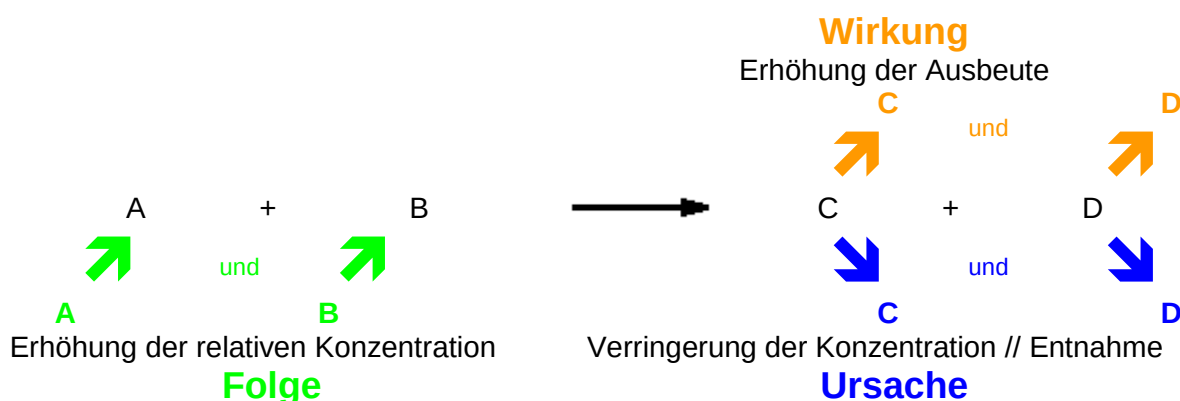
Aber auch ohne tiefgreifende mathematische Berechnungen kann man sich aus den schon beschriebenen Zusammenhängen und beobachteten Phänomenen ein gutes Regelwerk zusammenstellen.



Gibt man zu einer chemischen Reaktion mehr Ausgangsstoffe, dann werden sich auch mehr Reaktionsprodukte bilden. Es können sich einfach mehr Teilchen treffen und dann auch umsetzen. Vor unseren Betrachtungen in der Stoß-Theorie wissen wir auch, dass auch schon ausreicht, wenn man nur einen Stoff in der Konzentration / der Menge erhöht. Auch hierdurch steigt die Chance auf mehr Zusammenstöße mit anderen Teilchen und damit wiederum der Stoffumsatz.



Auch über die Entnahme von C und / oder D lässt sich die Reaktions-Geschwindigkeit zu-  
gunsten des Umsatzes von A und B erhöhen. Dies passiert indirekt dadurch, dass die gebil-  
deten Teilchen von C und D nicht behindernd zwischen den Teilchen der Ausgangsstoffe  
herumliegen. Die Ausgangsstoffe können sich praktisch ungehindert treffen.



Während die Zugabe von Ausgangsstoffen (bei ausreichend großen Reaktions-Gefäßen) kein prakti-  
sches Problem darstellt, muss man bei der Entnahme der Reaktionsprodukte zumeist ir-  
gendwelche Abtrenn-Verfahren anwenden. In vielen Reaktionen hilft die Natur der Sache  
schon ausreichend mit. Man denke an Reaktionen, bei denen sich (aus Flüssigkeiten und / oder  
Feststoffen) Gase bilden. Andere günstige Reaktionen laufen unter dem Absetzen eines Stof-  
fes (Roheisen-Herstellung, Fällungs-Reaktionen) ab. Die technische Chemie hat hier die  
verschiedensten Verfahren entwickelt, so dass kaum ein Stoff-Gemisch nicht effektiv ge-  
trennt werden kann. Selbst Gemische, die der Inbegriff von Nicht-Trennbarkeit sind (z.B. azeot-  
rope Gemische, wie Ethanol und Wasser) lassen sich dann doch durch einen cleveren Trick ausei-  
nanderbringen (Zusatz eines Schlepp-Mittels).

## Temperatur-Abhängigkeit

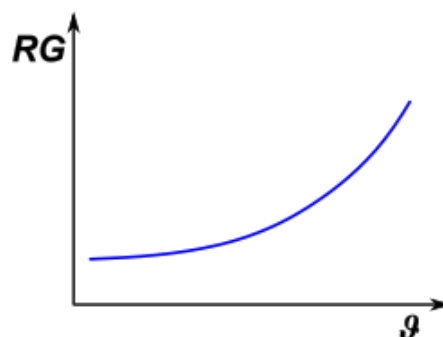
VAN'T-HOFFSche Regel / RGT-Regel (ReaktionsGeschwindigkeits-Temperatur-Regel)

Steigert man die Temperatur um 10 K (früher: 10 grd), dann erhöht sich die Reaktions-  
Geschwindigkeit zumeist um das zwei- bis dreifache. In seltenen Fällen kann die Geschwin-  
digkeit bis zum zehnfachen steigen.

alternativ: Steigt die Temperatur einer Reaktion um  
10 K, dann drittelt bis halbiert sich zumeist die Reak-  
tionszeit. In seltenen Fällen kann die Reaktionszeit  
auch nur noch ein Zehntel betragen.

Q10-Wert: Verhältnis der Reaktionsgeschwindigkeit  
bei Temperaturveränderung um 10 K

$$Q_{10} = \left( \frac{RG_{T+\Delta T}}{RG_T} \right)^{\frac{10K}{\Delta T}}$$

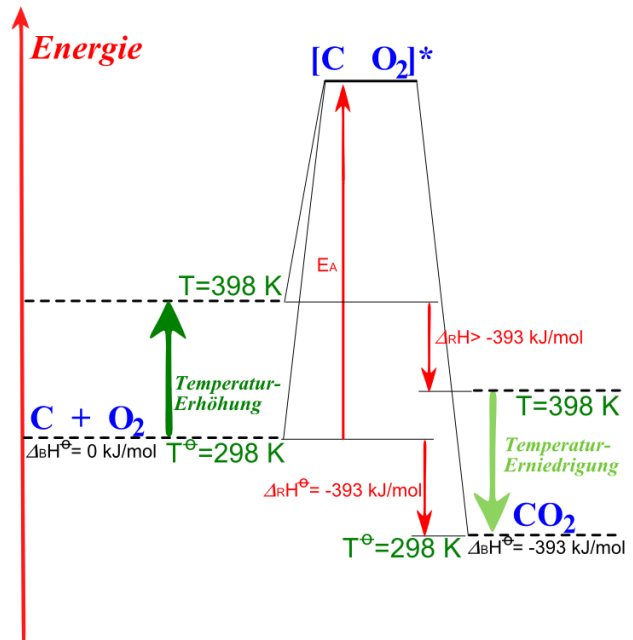


## Definition(en): Reaktions-Geschwindigkeit-Temperatur-Regel (RGT-Regel) VAN'T HOFFSche Regel

Erhöht man die Temperatur um 10 K (10 grd), dann erhöht sich die Reaktions-Geschwindigkeit einer Reaktion (durchschnittlich) um das Zwei- bis Drei-fache. Selten kann die Geschwindigkeits-Erhöhung auch bis zum Zehn-fachen betragen.

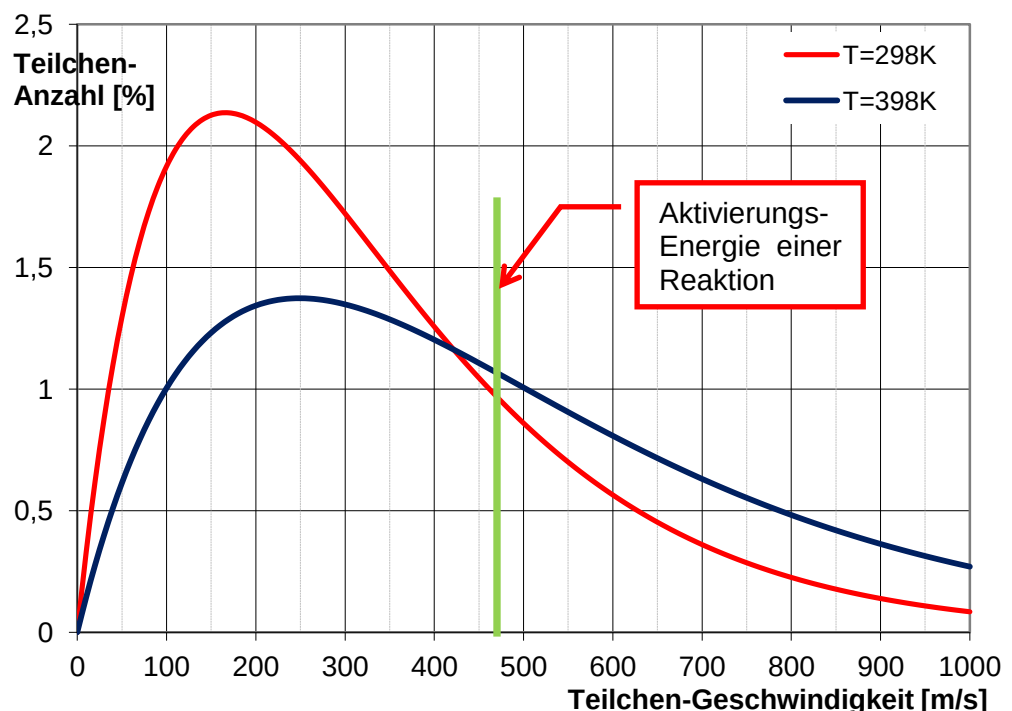
Mit Hilfe eines Energie-Schema's können wir den Reaktions-fördernden Effekt einer Temperatur-Erhöhung auch gut erklären.

Um die Temperatur-Erhöhung zu erreichen, muss den Ausgangsstoffen Energie zugeführt worden sein. Dies wird in einem erhöhten Energie-Niveau sichtbar. Das ursprüngliche Energie-Niveau ist für Standard-Bedingungen ( $T=25\text{ °C} = 298\text{ K}$ ;  $p=101,325\text{ kPa} = 1\text{ atm}$ ) festgelegt. Durch den höheren Energie-Level nach der Temperatur-Erhöhung haben nun mehr Teilchen die notwendige Aktivierungs-Energie (s.a. MAXWELL-BOLTZMANN-Diagramm → [Wärme-Bewegung der Teilchen \(BROWNSche Molekular-Bewegung\)](#)), um die Reaktion auszuführen.



Mit anderen Worten für Kohlenstoff und Sauerstoff ist es nun leichter über den Berg zu kommen als vorher.

Mehr Teilchen, die reagieren können, bedeuten eine größere Reaktions-Geschwindigkeit für sonst vergleichbare Bedingungen.



Einen genauen Zusammenhang leitete Svante ARRHENIUS (1859 – 1927) ab. Die entwickelte Funktion wird ihm zu Ehren ARRHENIUS-Gleichung genannt:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}} \quad \text{mit: } A \dots \text{Aktivierungs-Konstante (Frequenz-Faktor)}$$

Die molare Aktivierungs-Energie  $E_A$  (ARRHENIUS-Energie) berechnet sich dabei aus der molekularen Aktivierungs-Energie  $\varepsilon$  und der AVOGADRO-Konstante  $N_A$ . Innerhalb der chemischen Reaktion – auf Teilchen-Ebene – spielt nur die molekulare Aktivierungs-Energie eine Rolle. Sie entspricht im Wesentlichen der kinetischen Stoß-Energie der Teilchen.

Auch VAN'T HOFF beschäftigte sich intensiv mit der Temperatur-Abhängigkeit der Reaktions-Geschwindigkeit. Er fand den folgenden Zusammenhang:

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = - \frac{\Delta_R H}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

dessen Verallgemeinerung in der nach ihm benannte Regel (auch als RGT-Regel bezeichnet) ihren Wiederhall findet.

**Erhöht man die Temperatur um 10 K (= 10 grd), dann steigt die Reaktionsgeschwindigkeit um das 2- bis 3-fache (selten bis zum 10-fachen).**

### Aufgaben:

- 1. Stellen Sie in einem Diagramm die Reaktions-Geschwindigkeit gegen die Temperatur (Bereich von 250 bis 350 K) dar, wenn der Steigerungs-Faktor bei 2,4 liegt und die Geschwindigkeit bei 250 K mit  $0,02 \text{ mol}^1 \text{s}^{-1}$  ermittelt wurde. Mit welcher Achsen-Skalierung erhalten Sie eine lineare Funktion?)*
- 2. Stellen Sie die Energieniveau-Diagramme von einer Reaktion mit hoher Geschwindigkeit und einer mit niedriger Geschwindigkeit vergleichend gegenüber!*
- 3. Prüfen Sie die Gültigkeit der RGT-Regel (VAN'T HOFFsche Regel) mittels ARRHENIUS-Gleichung! (Beispielhaft können Sie eine Aktivierungs-Energie von 75 kJ/mol und die Temperatur-Erhöhung von 20 auf 30 °C sowie von 50 auf 60 °C benutzen.)*
- 4. Finden Sie praktische Anwendungen für die RGT-Regel in Schule und Haushalt!*

### für das gehobene Anspruchsniveau:

- 5. Gilt die VAN'T HOFFsche Regel eigentlich auch, wenn man die Temperatur von 90 auf 110 °C erhöht?*
- 6. Formulieren Sie eine RGT-Regel für den Temperatur-Anstieg von 20 K!*

---

## Temperatur-Abhängigkeit der Auflöse-Zeit von Süßstoff-Tabletten

### **Materialien / Geräte:**

Süßstoff-Tabletten, 5 Reagenzgläser (1 reicht praktisch), Becherglas, Filzstift; (digitales) Thermometer, Stopp-Uhr (z.B. vom Smartphone); Topf mit heißem Wasser (80 – 90 °C); Leitungswasser

### **Hinweise:**

- es können mit Eiswürfeln auch tiefere Temperaturen als 20 °C erzielt und benutzt werden, dann ist aber damit zu rechnen, dass der exakte Auflöse-Zeitpunkt schwerer zu beobachten ist (ev. mehrere gemittelte Versuche machen)
- wenn exakte Temperatur-Sprünge als Start-Temperatur genutzt werden sollen, dann bietet sich das Erwärmen der befüllten Reagenzgläser im Wasser-Bad unter Temperatur-Beobachtung an

### **Durchführung / Ablauf:**

- kennzeichnen Sie sich an den Reagenzgläsern eine einheitliche Höhe (4 – 5 cm)
- mischen Sie sich für jeden Versuch aus dem heißem und dem Leitungswasser in einem Becherglas Probenwasser mit 5 unterschiedlichen Temperaturen (optimal zwischen 20 und 80 °C; beliebige Werte möglich)
- füllen Sie das Reagenzglas bis zum Höhenstrich und messen Sie die Wasser-Temperatur
- lassen Sie nun eine Süßstoff-Tablette in das Wasser fallen und stoppen Sie die Zeit bis zur vollständigen Auflösung

### **Auswertungen / Berechnungen:**

- sammeln Sie die Meßwerte im Kurs und werten Sie diese dann als ein Datensatz aus
- stellen Sie die Reaktions-Zeiten (Auflöse-Zeiten) gegen die Temperatur graphisch dar
- als Einheit für berechnete Reaktions-Geschwindigkeiten bietet sich [ 1 (Tabletten-Auflösung bzw. Umsatz) pro Zeit] an

## Berechnung der Aktivierungs-Energie



setzt Kenntnisse zur Reaktions-Kinetik voraus

die Aktivierungs-Energie steht im Zusammenhang zur Reaktions-Geschwindigkeit

die Aktivierungs-Energie ist die Energie, die minimal für den aktivierten Übergangs-Zustand notwendig ist

dabei ist es egal von welcher Ausgangs-Temperatur (hier T1 bzw. T2) die Reaktion startet natürlich sind es mehr der Teilchen A, die ausgehend von der Ausgangs-Temperatur T2 die notwendige Energie haben, als von den Teilchen mit dem Ausgangs-Niveau T1

Reaktions-Geschwindigkeits-Konstante  $k$ , präexponentieller Frequenz-Faktor  $A$ , Aktivierungs-Energie  $E_A$ , allgemeine Gas-Konstante  $R$ , Temperatur  $T$

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot T}}$$

nach einem Logarithmieren ergibt sich:

$$\ln \frac{k}{A} = - \frac{E_A}{R \cdot T}$$

man kann nun den Temperatur-unabhängigen Faktor  $A$  mit in die Konstante einbeziehen und bekommt so:

$$\ln k = - \frac{E_A}{R \cdot T} + \text{const}$$

Praktisch kommt bei der Darstellung von  $\ln k$  gegen  $1/T$  in einem Diagramm eine Gerade heraus, die eine Bestimmung von  $E_A$  ermöglicht. Ein solches Diagramm wird **ARRHENIUS-Graph** genannt.

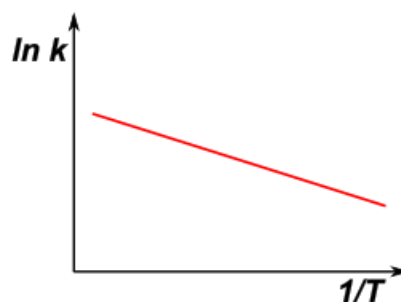
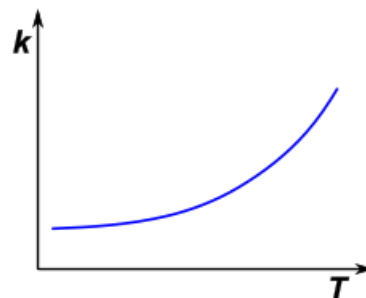
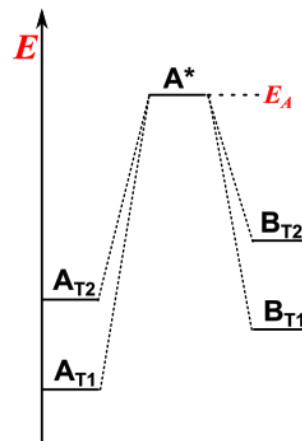
Für zwei verschiedene Temperaturen lassen sich entsprechend zwei eigene Berechnungs-Gleichungen aufstellen.

$$k_1 = A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot T_1}} \quad k_2 = A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot T_2}}$$

Diese beiden Gleichungen lassen sich nun benutzen, um  $E_A$  zu ermitteln:

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot T_2}}}{A \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot T_1}}} \quad \frac{k_2}{k_1} = \frac{e^{\frac{-E_A}{R \cdot T_2}}}{e^{\frac{-E_A}{R \cdot T_1}}} \quad \frac{k_2}{k_1} = e^{-\frac{E_A}{R \cdot T_2} + \frac{E_A}{R \cdot T_1}}$$

Über den natürlichen Logarithmus erhalten wir dann:



ARRHENIUS-Graph



$$\ln \frac{k_2}{k_1} = -\frac{E_A}{R \cdot T_2} + \frac{E_A}{R \cdot T_1} = \frac{E_A}{R} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1}$$

Am Ende stellen wir nach  $E_A$  um und erhalten:

$$E_A = R \cdot \frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{k_2}{k_1}$$

### Aufgaben:

#### **1. Logarithmieren Sie die folgenden Ausdrücke!**

- a)  $a \cdot b = c \cdot d$                       b)  $a \cdot b / c$                       c)  $4 \cdot x^3$   
d)  $a \cdot b / (c \cdot d)$                       e)  $a^b / c^d$                       f)  $5a \cdot b^4 / (3c \cdot d^e)$

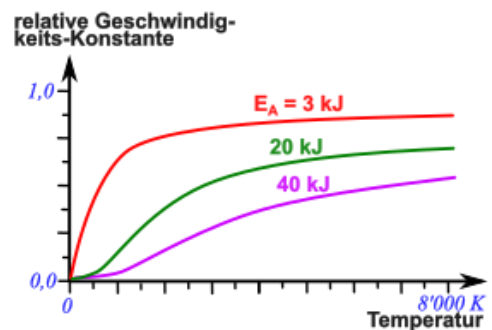
#### **2. Erstellen Sie in einer Tabellen-Kalkulation eine Funktions-Tabelle nach folgenden Schema! Lassen Sie die fehlenden Werte berechnen! (weitere Zwischenwerte für $x$ sind möglich)**

| x    | y=x <sup>2</sup> | lg y |
|------|------------------|------|
| 0,1  |                  |      |
| 0,2  |                  |      |
| 0,5  |                  |      |
| 1    |                  |      |
| 2    |                  |      |
| 5    |                  |      |
| 10   |                  |      |
| 20   |                  |      |
| ...  |                  |      |
| 1000 |                  |      |

#### **3. Erstellen Sie in der Tabellen-Kalkulation die folgenden drei Diagramme!**

- a)  $x$  und  $y$  als klassisches Funktions-Diagramm  
b)  $x$  gegen  $\lg y$  als klassisches Funktions-Diagramm  
c) in einem kopierten Diagramm von a) wird die  $y$ -Achse in die logarithmische Skalierung formatiert

#### **4. Welchen Sinn macht das Logarithmieren hier?**



### Aufgaben:

- 1.
2. Nennen Sie die RGT-Regel! Erklären Sie, wie diese Regel physikalisch funktioniert!
3. Ein Mitschüler behauptet, dass auch die folgende Formulierungen für die RGT-Regel ebenfalls gültig sind. Setzen Sie sich mit der Aussage auseinander!  
"Erhöht man in einem chemischen System die Temperatur auf 10 °C, dann steigt die Reaktions-Geschwindigkeit immer um das zweifache."
4. Eine Schülerin behauptet, dass Kühlschränke eigentlich Geräte sind, deren Nutzeffekt auf der RGT-Regel beruhen. Beurteilen Sie den Wahrheits-Gehalt dieser Behauptung! Begründen Sie ausführlich!
5. In einem Stoff-Gemisch aus zwei Reaktanten (z.B. A und B) besitzen die Teilchen lt. der gemessenen Temperatur eine kinetische Energie von 146 J. Die Reaktion (z.B. zum Produkt C) verbraucht pro Teilchen-Umsatz 5 J. Für die Auslösung der Reaktion wird eine kinetische Energie von 150 J gebraucht. Überlegen Sie sich, was im Reaktions-Gefäß passieren wird! Läuft die Reaktion ab oder nicht (betrachtet auf eine beliebig lange Zeit; es wird bei Standard-Bedingungen gearbeitet; alle Stoffe sind gasförmig oder flüsig)? Stellen Sie eine Hypothese auf! Erklären und begründen Sie ausführlich!

| Teilchen und<br>betroffene Bindung                                                              | Aktivierungs-Energie         |                            |  |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------|--|--|--|
|                                                                                                 | E <sub>A</sub><br>[kcal/mol] | E <sub>A</sub><br>[kJ/mol] |  |  |  |
| H – H                                                                                           | 104                          | 435                        |  |  |  |
| F – F                                                                                           | 37                           | 155                        |  |  |  |
| Cl – Cl                                                                                         | 58                           | 243                        |  |  |  |
| Br – Br                                                                                         | 46                           | 193                        |  |  |  |
| I – I                                                                                           | 36                           | 151                        |  |  |  |
| H <sub>3</sub> C – CH <sub>3</sub>                                                              | 88                           | 368                        |  |  |  |
| H <sub>2</sub> N – NH <sub>2</sub>                                                              | 56                           | 234                        |  |  |  |
| HO – OH                                                                                         | 51                           | 214                        |  |  |  |
| H <sub>3</sub> C – HgCH <sub>3</sub>                                                            | 50                           | 209                        |  |  |  |
| CH <sub>3</sub> –CH <sub>2</sub> – CH <sub>2</sub> –CH <sub>3</sub>                             | 87                           | 364                        |  |  |  |
| (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH – CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                          | 78                           | 327                        |  |  |  |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> –CH <sub>2</sub> – CH <sub>2</sub> –C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> | 47                           | 197                        |  |  |  |
| (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> –CO – CO–(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>                        | 37                           | 155                        |  |  |  |
| C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> –COO – COO–C <sub>6</sub> H <sub>5</sub>                          | 30                           | 126                        |  |  |  |
| H <sub>3</sub> C–N=N – CH <sub>3</sub>                                                          | 46                           | 193                        |  |  |  |
| NC–C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> –N=N – C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> –CN                 | 31                           | 130                        |  |  |  |
|                                                                                                 |                              |                            |  |  |  |
|                                                                                                 |                              |                            |  |  |  |

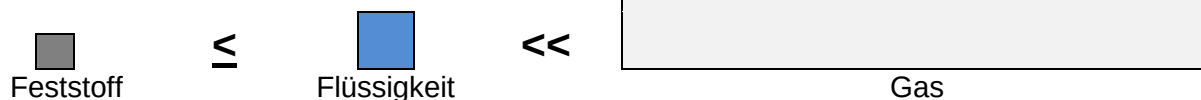
Die hier notierten Aktivierungs-Energien für die homolytische Spaltung der markierten Bindung entsprechen den molaren Dissoziations-Energien.

---

## Druck-Abhängigkeit

praktisch sind nur Reaktionen, die mit Volumen-Veränderungen verbunden sind, auch für die Einflussnahme durch Druck empfindlich  
dies trifft immer dann zu, wenn Gase gebildet oder aus Ausgangsstoff(e) verbraucht werden  
bei Flüssigkeiten und Feststoffen bewirken Drücke kaum effektive Volumen-Veränderungen;  
damit ändert sich auch die Konzentration nur geringfügig  
in den meisten Betrachtungen kann man auch die Volumina von Flüssigkeiten und Feststoffen vernachlässigen, da diese im Vergleich zu Gas-Volumen minimal sind  
Im Prinzip handelt es sich um eine Beeinflussung der Konzentration, da die Teilchen bei Druck-Erhöhung einfach dichter liegen und damit die Chancen für Teilchen-Kontakte steigen

**Vergleich der molaren Volumen  
von Feststoffen, Flüssigkeiten  
und Gasen (schematisch)**



| Stoff                 | Symbol /<br>Formel | Dichte<br>[kg/l] | molares<br>Volumen<br>[l/mol] | Molarität<br>[mol/l] |  |
|-----------------------|--------------------|------------------|-------------------------------|----------------------|--|
| Aluminium             | Al                 | 2,7              |                               |                      |  |
| Ammoniak (g)          | NH <sub>3</sub>    | 0,000.77         | 22,4                          | 0,0446               |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
| Blei                  | Pb                 | 11,34            |                               |                      |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
| Cohlenstoff (Graphit) | C                  |                  |                               |                      |  |
| Cohlen(stoff)dioxid   | CO <sub>2</sub>    | 0,001.98         | 22,4                          | 0,0446               |  |
| Cohlen(stoff)monoxid  | CO                 | 0,001.25         | 22,4                          | 0,0446               |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
| Eisen                 | Fe                 | 7,86             |                               |                      |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
| Gold                  | Au                 | 19,3             |                               |                      |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
| Platin                | Pt                 | 21,45            |                               |                      |  |
| Phosphor (weiß)       | P                  | 1,82             |                               |                      |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
| Sauerstoff            | O <sub>2</sub>     | 0,001.43         | 22,4                          | 0,0446               |  |
| Stickstoff            | N <sub>2</sub>     | 0,001.25         | 22,4                          | 0,0446               |  |
| Schwefel              | S                  | 2,06             |                               |                      |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
| Wasser                | H <sub>2</sub> O   | 1,0              |                               |                      |  |
| Wasserstoff           | H <sub>2</sub>     | 0,000.09         | 22,4                          | 0,0446               |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |
| Zink                  | Zn                 | 7,13             |                               |                      |  |
|                       |                    |                  |                               |                      |  |

## Verfolgung chemischer Reaktionen über den Druck



Wir haben schon festgestellt, dass Gase ein besonders herausragendes Volumen bezüglich einer Stoffmenge bzw. eine Stoff-Masse haben. Arbeit man in geschlossenen Gefäßen, dann das Volumen sich selten ausdehnen. Somit muss der Druck steigen.

Kommt es also zu Reaktionen mit Veränderungen der Aggregatzustände hin oder weg zu gasförmig, kann man diese in geschlossenen Systemen mit konstanten Volumen anhand der Druck-Veränderungen beobachten.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$R \cdot T = f_{RT}$$

$$p \cdot V = n \cdot f_{RT}$$

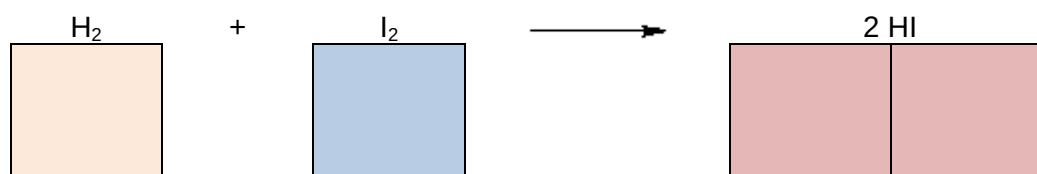
$$p \cdot V \sim n$$

Erfassbar werden die einzelnen Gase mit selektiven Sonden, welche die Anteile der Reaktions-Stoffe erfassen können. Wir kommen dann an die Partialdrücke, also den Druck-Anteil des einzelnen Gases am Gesamtdruck. Der Gesamtdruck ist die Summe der Partialdrücke der einzelnen Gase im Gemisch.

$$p_{\text{Ges}} = p_i[\text{St}_1] + p_i[\text{St}_2] + p_i[\text{St}_3] + \dots + p_i[\text{St}_n]$$

Aber auch einige Gas-Reaktionen lassen sich über den Druck beobachten. Voraussetzung ist aber, dass sich unterschiedliche molare Volumen für die Ausgangsstoffe und die Reaktions-Produkte ergeben.

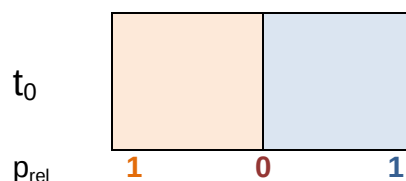
Eine Reaktion, bei der z.B. aus 2 mol Gase wieder 2 mol Gase entstehen, bewirken keine Druck-Veränderungen.



Die Reaktion würde praktisch ohne Volumen- oder Druck-Veränderungen ablaufen. Könnte man zu den einzelnen Reaktions-Zeitpunkten die Volumen selektieren, dann ergäbe sich in etwa das folgende Bild. Dabei gehen wir auch davon aus, dass bei der Reaktion nur die Bildung stattfindet.

Eine eventuelle Rück-Reaktion soll es nicht geben. (Dazu später mehr → .)

Die Mengen-Verhältnisse lassen sich sowohl über die Stoffmenge als auch über die Partial-Drücke betrachten. Gehen wir von anfänglich je einer Druck-Einheit beider Ausgangsstoffe aus. Vom Reaktions-Produkt gibt es noch nichts. Das bedeutet dessen Partial-Druck beträgt 0 Einheiten.



Nach einer bestimmten Zeit hat schon ein Teil der beiden Ausgangsstoffe miteinander reagiert. Genau diese Anteile werden jetzt durch die gebildeten Reaktions-Produkte ausgefüllt.

Die Partial-Drücke der Ausgangsstoffe haben sich verringert, da sie sich gemeinsam umgewandelt haben. Diese neu gebildete Menge wird durch  $u$  beschrieben. Je eine Hälfte stammt von je einem der Ausgangsstoffe.

Aus rechen-praktischen Gründen umschreiben wir  $u$  gleich durch  $2x$ . Soe können wir ein  $x$  jeweils bei einem der Ausgangsstoffe abziehen..

Wieder etwas später ist der Anteil der Reaktions-Produkte weiter gestiegen. Dafür nimmt proportional der Anteil der Ausgangsstoffe ab.

Aus unseren Betrachtungen zur Stoß-Theorie wissen wir, dass es im Verlauf der Reaktion immer seltener zu effektiven Treffen der beiden Ausgangs-Stoffe kommt.

Also werden die Veränderungen an den Anteilen auch immer geringfügiger ausfallen.

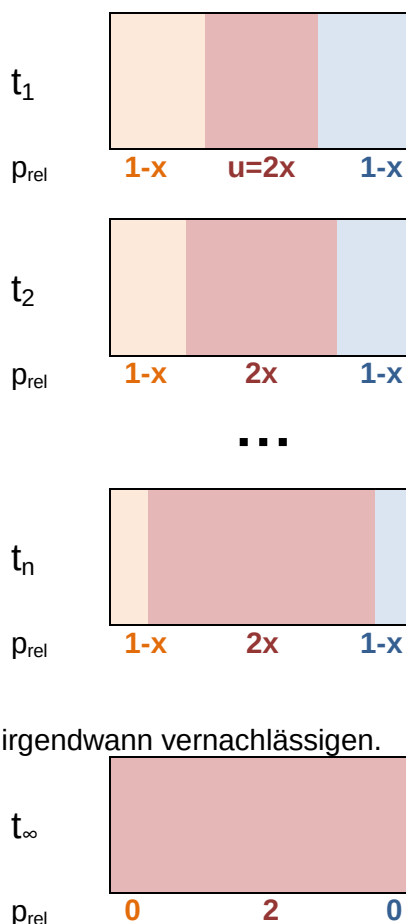
Theoretisch wird es niemals zum vollständigen Umsatz kommen.

Die kleinen Rest-Anteile der Ausgangsstoffe können wir aber irgendwann vernachlässigen.

Unterstellen wir den vollständigen Umsatz, dann haben wir irgendwann nur noch Reaktions-Produkt im Reaktions-Gefäß.

Am Ende haben wird der Gesamtdruck nur noch durch die beiden Stoffmengen des Reaktions-Produktes gebildet.

Für ein imaginäres Teilchen-Modell mit jeweils 1000 Teilchen jedes Ausgangsstoffs ergäben sich bei einem Umsatzfaktor von 0,2 die folgenden Teilchen-Zahlen:



| Zeit           | 0     | 1     | 2     | 3    | 4     | 5     | 6     | ... | n                          | $\infty$ |
|----------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-----|----------------------------|----------|
| H <sub>2</sub> | 1'000 | 800   | 640   | 512  | 410   | 328   | 262   |     | $N_0 * f^n$                | 0        |
| I <sub>2</sub> | 1'000 | 800   | 640   | 512  | 410   | 328   | 262   |     | $N_0 * f^n$                | 0        |
| AS             | 2'000 | 1'600 | 1'280 | 1024 | 820   | 656   | 524   |     | $N_0 * f^n$                | 0        |
| HI             | 0     | 400   | 720   | 976  | 1'180 | 1'344 | 1'476 |     | $N_\infty - N_0[AS] * f^n$ | 2'000    |
| RP             | 0     | 400   | 720   | 976  | 1'180 | 1'344 | 1'476 |     | $N_\infty - N_0[AS] * f^n$ | 2'000    |

Beachtet man die Umkehrbarkeit von chemischen Reaktionen, dann wird das Modell etwas komplizierter. Dazu später mehr (→ [5.3.2. das chemische Gleichgewicht](#)).

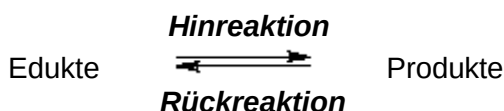
### Aufgaben:

1. Erstellen Sie eine Daten-Tabelle für ein Teilchen-Modell, dass mit 10'000 Teilchen jedes Ausgangsstoffes beginnt! Der Stoff-Umsatz liegt zwischen den Takten immer bei 0,15 %. Gehen Sie von 20 Zeit-Takten aus!
2. Erstellen Sie aus der Daten-Tabelle ein passendes Diagramm!
3. Setzen Sie die Tabelle sich selbst kalkulierend in einer Tabellenkalkulation um (z.B. microsoft Office Excel od. libreOffice.org Calc! Erstellen Sie aus der Tabelle ein passendes Diagramm!

### 5.3.2. das chemische Gleichgewicht



Zu fast jeder chemischen Reaktion gibt es eine Rück-Reaktion. Aus den Produkten werden wieder die Edukte. Da die Produkte, in dem Augenblick, wo sie neu gebildet wurden auch wieder miteinander reagieren können, beginnt praktisch sofort nach der Produkt-Bildung auch wieder die Rück-Bildung der Edukte.



Chemische Reaktionen sind im Allgemeinen umkehrbar, d.h. Hin- und die Rück-Reaktion laufen gleichzeitig ab. Ausnahmen gibt es z.B. bei photochemischen Reaktionen.

Wie wir schon gesehen haben, ist die Reaktions-Geschwindigkeit besonders von der Konzentration der Stoffe abhängig.

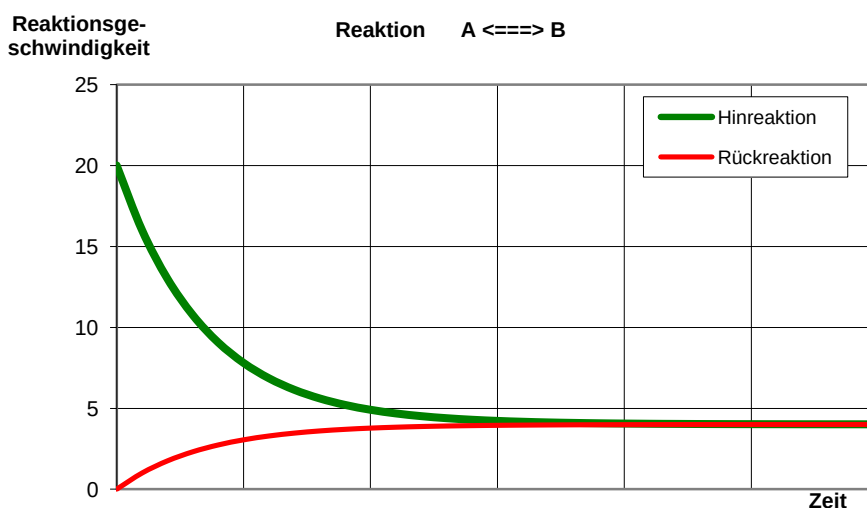
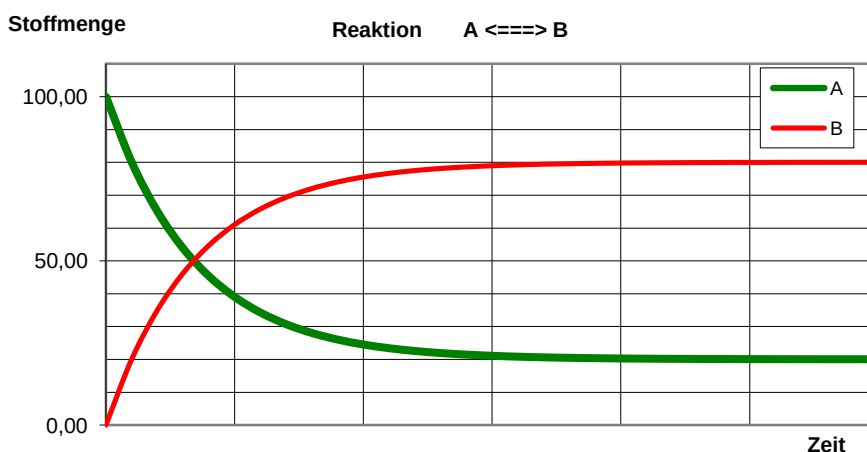
Die Umwandlung des / der Ausgangsstoffe beginnt ganz typisch und unterscheidet sich erst einmal nicht von den gerichteten Reaktionen.

Zu Anfang sind keine oder nur wenige Produkte vorhanden, so

dass die Rück-Reaktion auch nur schleppend anläuft. Je mehr dann aber von den Produkten da sind, umso stärker ist auch die Rück-Reaktion.

Irgendwann ist der Punkt erreicht, in dem die Geschwindigkeiten von Hin- und Rück-Reaktion genau identisch sind. Wir sprechen dann vom chemischen Gleichgewicht. Dieses ist ein dynamisches Gleichgewicht. Ständig werden irgendwo im Reaktions-Gefäß neue Produkte gebildet, während woanders wieder Produkte die Rück-Reaktion eingehen.

Betrachtet man die Konzentrationen der reagierenden Stoffe, dann erkennt man das chemische Gleichgewicht am waagerechten und parallelen Verlauf der Graphen zueinander. Auch aus der Sicht der Konzentrationen ist das Gleichgewicht dynamisch. Zwar werden ständig



neue Teilchen gebildet, aber der Zerfall (aller Teilchen) der Reaktionsprodukte ist genauso groß. Beide Konzentrationen ändern sich nicht, werden aber ständig durch neue / andere Teilchen aufrechterhalten.

**Definition(en): umkehrbare chemische Reaktion**

Bei einer umkehrbaren chemischen Reaktion gibt es zur gegebenen (Hin-)Reaktion eine genau entgegengesetzte Rück-Reaktion.

Eine chemische Reaktion ist umkehrbar, wenn es zur besagten Reaktion eine gibt, bei der die Reaktionsprodukte mit den Ausgangsstoffen getauscht sind.

**Definition(en): chemisches Gleichgewicht**

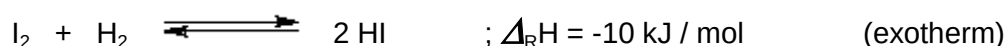
Das chemische Gleichgewicht ist der Zustand, bei dem sich äußerlich keine Veränderungen der Stoff-Konzentrationen mehr feststellen lassen.

Das chemische Gleichgewicht ist die zeitliche Phase einer chemischen Reaktion, bei der Hin- und Rück-Reaktion gleichstark ablaufen.

$$RG \text{ (Hinreaktion)} = RG \text{ (Rückreaktion)}$$

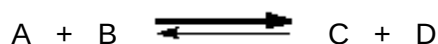
Ein chemisches Gleichgewicht ist die dynamische Ausgeglichenheit einer umkehrbaren chemischen Reaktion mindestens in einem geschlossenen System.

klassisches Beispiel: Bildung von Iodwasserstoff aus den Elementen (alle Stoffe gasförmig)



Wie sehen die Diagramme für chemische Gleichgewichte mit unterschiedlicher Stärke der Hin- bzw. Rück-Reaktion aus?

Betrachten wir zuerst die besonders starke Hin-Reaktion. In einer allgemeinen Reaktion und der zugehörigen Gleichung sähe das so aus:





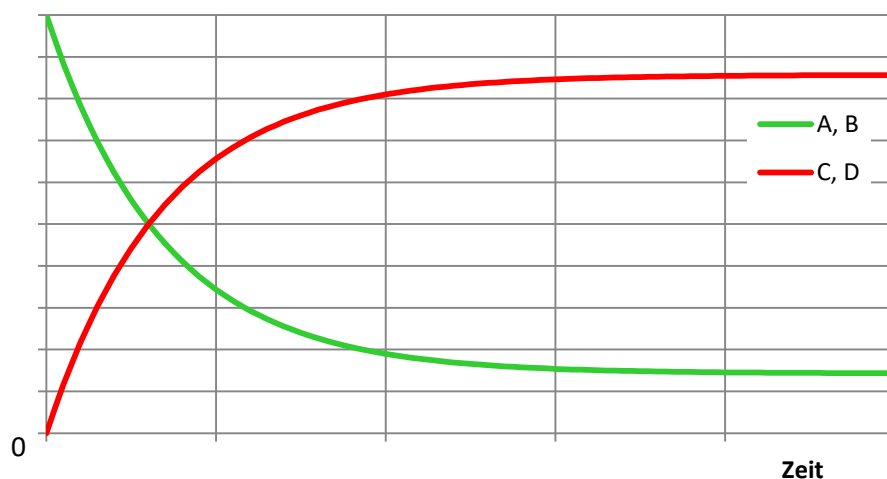
Die Ausgangsstoffe verbrauchen sich sehr schnell. Dementsprechend liegt auch ziemlich schnell eine große Konzentration von Reaktionsprodukten vor.

Wir erhalten – ein "typisches" Diagramm mit sich schneidenden Konzentrationskurven.

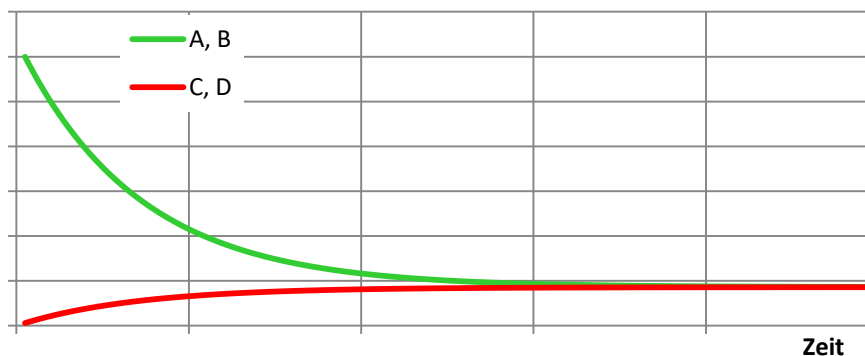
Das Diagramm für den Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit zeigt eine typische niedrige Lage der Gleichgewichtsgeschwindigkeit. Für die Reaktionsprodukte ist schon per Bedingung so. Bei den Ausgangsstoffen ist die Konzentration mittlerweile

so klein, dass die effektive Geschwindigkeit nur noch gering sein kann.

Konzentration



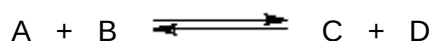
RG



### Aufgaben für die gehobene Anspruchsebene:

1. Warum unterscheiden sich die Schnittpunkte der Kurven zeitlich so deutlich? Erklären Sie!
2. Ermitteln Sie das Verhältnis der beiden Geschwindigkeits-Konstanten zueinander!

Als nächstes betrachten wir eine Reaktion, bei der die Hin- und Rück-Reaktionen ungefähr gleich stark ausgeprägt sind:

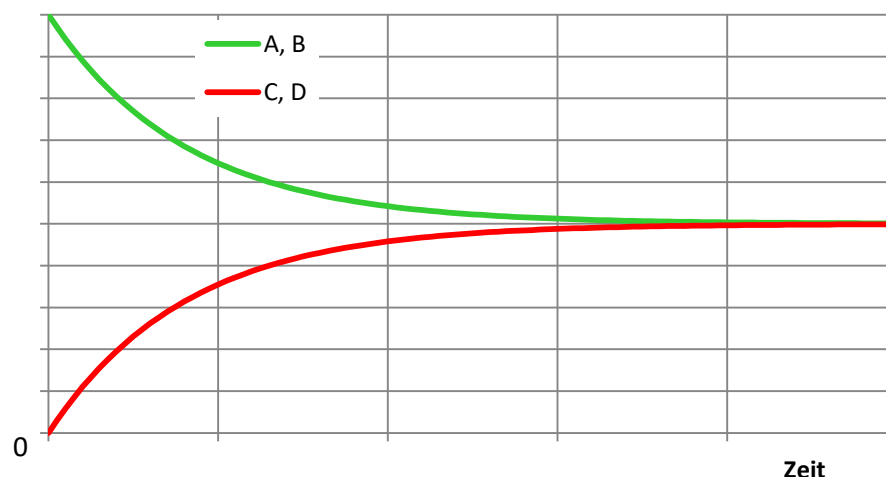


Für die Modellierung wurde sogar von gleich starken Hin- und Rück-Reaktionen ausgegangen.

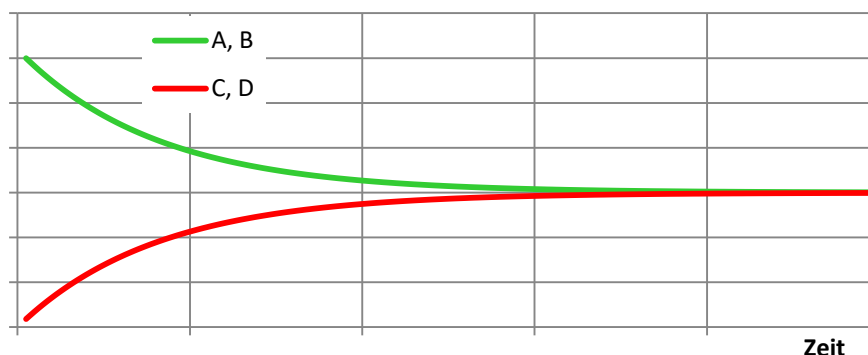
In diesem Fall treffen sich die Kurven zur gleichen Zeit.

In dem Augenblick, wenn die Ausgangsstoff-Konzentration halbiert wurde, ist die der Produkte auf ebenfalls 50 % der maximal zu erwartenden gestiegen. Für beide Reaktions-Richtungen ergeben sich jetzt gleiche Stoff-Umsätze und somit gleiche Momentan-Geschwindigkeiten.

Konzentration



RG



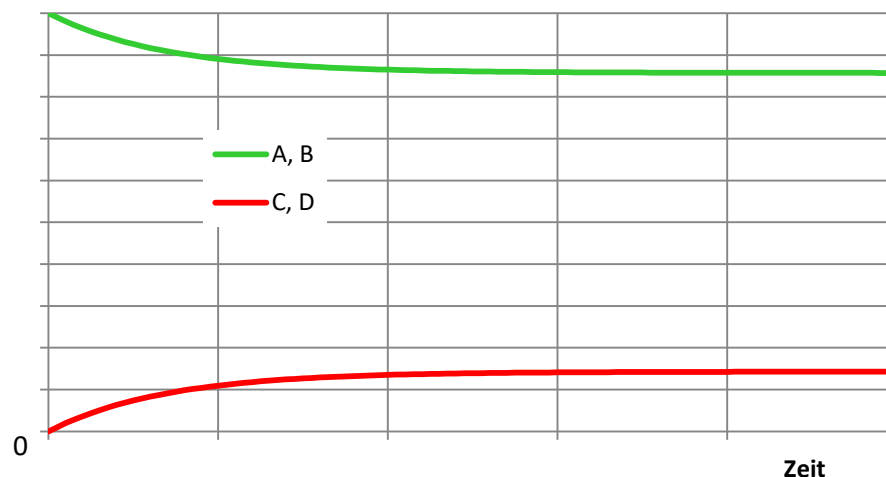
Der letzte – zu betrachtende Fall – geht von einer starken Rück-Reaktion aus:



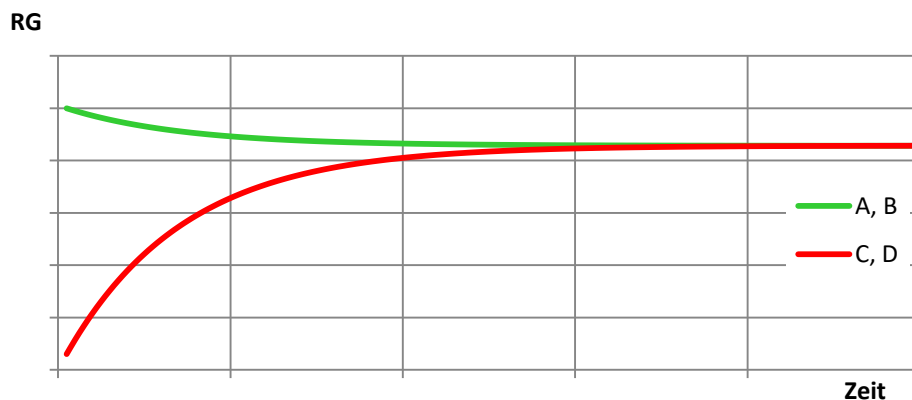
Auffällig für das Konzentrations-Zeit-Diagramm ist der fehlende Schnittpunkt der Kurven.

Dieses Mal ist der Stoff-Umsatz für die Hin-Reaktion zu Anfang – trotz hoher Stoff-Konzentration sehr klein. Dies genau besagt ja die Annahme einer bevorteilten Rück-Reaktion.

Konzentration



Die Rück-Reaktion ist durch einen hohen Umsatz – auch schon bei kleineren Produkt-Konzentrationen charakterisiert. Die Gleichgewichts-Geschwindigkeit ist somit immer sehr groß.



### Aufgaben:

- 1.
- 2.
- 3.

Versuch 1

| Stoff | Ausgangs-Konzentration | Konzentration nach |  |  |
|-------|------------------------|--------------------|--|--|
|       |                        |                    |  |  |

### Aufgaben:

1. Lesen Sie sich die folgende Versuchs-Beschreibung durch!
2. Erstellen Sie ein Kurz-Protokoll mit einer Stickpunkt-artigen Vorbetrachtung! Gehen Sie darauf ein, welche Teile des Modell's für welche chemischen Sachverhalte stehen sollten! Die Vorbetrachtung sollte weiterhin eine Skizze für das vermutete Diagramm (quasi experimentelle These) und eine kurze Erklärung dafür enthalten!
3. Führen Sie den Modell-Versuch durch!
4. Vervollständigen Sie das Kurz-Protokoll (Stichwort-artig)

### Modell-Versuch zum chemischen Gleichgewicht (Hebe-Modell)

#### **Materialien / Geräte:**

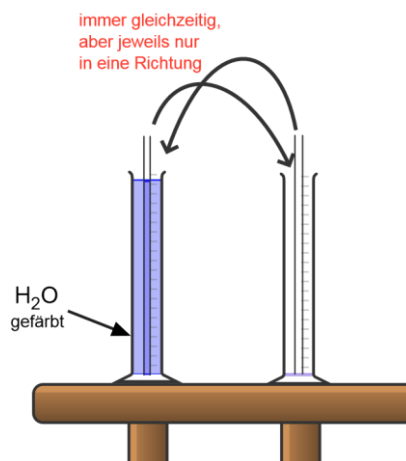
2 Meß-Zylinder; 2 unterschiedlich dicke Glasrohre (länger als die Höhe der Meß-Zylinder); Leitungswasser (ev. mit Lebensmittel-Farbe etwas angefärbt)

#### **Hinweise:**

- der Versuch kann zum Vergleich auch reziprok (mit getauschten Glasrohren) gestartet werden
- die Glasrohre müssen immer gleich in dem einen Zylinder gefüllt und in dem anderen geleert werden (die Glasrohre dürfen nicht getauscht werden! ev. kennzeichnen)

#### **Durchführung / Ablauf:**

- der eine Zylinder wird bis zum höchsten Wert mit Wasser gefüllt
- Start-Wasser-Volumen in beiden Zylinder notieren
- solange Wiederholen (Glasrohr-Volumen übertragen) bis dreimal keine Änderungen der Messwerte mehr aufgetreten sind
  - mit der einen (linken) Hand das eine Glasrohr bis auf den Grund in den linken Zylinder eintauchen; mit der anderen Hand das andere Glasrohr in den anderen Zylinder eintauchen - Rohre mit dem Daumen verschließen
  - Rohre über Kreuz zum anderen Zylinder führen und durch Abheben des Daumens entleeren
  - leere Rohre wieder zum anderen Zylinder zurückbewegen
  - Wasser-Volumen in beiden Zylinder notieren



#### **Auswertungen / Berechnungen:**

- überlegen Sie sich, welche Details im Modell für welche chemischen Sachverhalte stehen
- stellen Sie die Messwerte für beide Zylinder gegen die Arbeits-Takte in einem Diagramm dar

### 5.3.2.1. das Massenwirkungs-Gesetz



Das Massenwirkungs-Gesetz wurde von Cato Maximilian GULDBACH und Peter WAAGE (1864 / 1867) entwickelt und veröffentlicht. Die Datierung lässt erahnen, dass die Chemie damals in ihren Anfängen steckte und die Verfolgung chemischer Reaktionen nur dann möglich war, wenn sie ausreichend langsam abliefen und über Masse- oder Volumen-Veränderungen beobachtbar waren.

Schon damals erkannten viele Chemiker den Charakter von umkehrbaren Reaktionen und dem dahintersteckenden chemischen Gleichgewicht.

GULDBACH und WAAGE gingen bei ihren Betrachtungen noch von der sogenannten aktiven Masse aus – heute nutzen wir die Konzentration als Basis-Größe. Letztendlich deutet der Name immer noch auf diese Ursprünge hin.

Zu Anfang wurden ihre Erkenntnisse kaum beachtet. Erst als JELLETT (1873) und VAN'T HOFF (1877) zu ähnlichen Ergebnissen kamen, besann man sich wieder auf GULDBACH und WAAGE.

Für das Massenwirkungs-Gesetz gibt es bestimmte Bedingungen. So muss die chemische Reaktion umkehrbar sein, in einem abgeschlossenen (od. auch isolierten) System ablaufen und sich das chemische Gleichgewicht eingestellt haben. Weiterhin sollte es sich um ein homogenes System handeln.



Es gelten für die Geschwindigkeiten der Hin- und der Rück-Reaktionen die bekannten Gleichungen (siehe rechts).

Da im chemischen Gleichgewicht Hin- und Rück-Reaktionen gleich groß (lt. Definition des Chem. Gleichgewichts) sind, können wir die Geschwindigkeits-Gleichungen gleich setzen.

Durch\* Umformen bringen wir die Geschwindigkeits-Konstanten auf die eine und die Konzentrationen auf die andere Seite.

Letztendlich definieren wir uns eine neue Konstante  $K_C$ , die Gleichgewichts-Konstante bezogen auf gegebene Konzentrationen. (Wir werden später zeigen, dass man auch Drücke für die Berechnungen benutzen kann. Diese Konstante wird dann  $K_p$  genannt.)

Die so abgeleitete Formel wird Massenwirkungs-Gesetz (MWG) genannt.

Der Wert von  $K_C$  liefert uns einige wichtige Informationen zur Lage des Gleichgewichts.

$$RG_H = k_H \cdot c_A \cdot c_B$$

$$RG_R = k_R \cdot c_C \cdot c_D$$

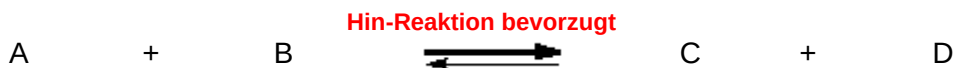
$$RG_H = RG_R$$

$$k_H \cdot c_A \cdot c_B = k_R \cdot c_C \cdot c_D$$

$$\frac{RG_H}{RG_R} = \frac{k_H}{k_R} = \frac{c_C \cdot c_D}{c_A \cdot c_B}$$

$$K_C = \frac{c_C \cdot c_D}{c_A \cdot c_B}$$

Nehmen wir den klassischen Fall, dass die Hin-Reaktion stärker ist als die Rück-Reaktion.

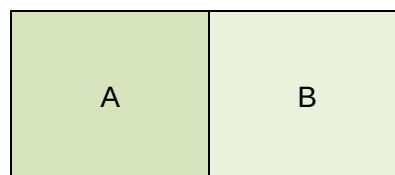


Bei diesen Reaktionen beobachten wir einen  $K_c > 1$ . Das liegt daran, dass der Zähler (/ die Produkte) größer ist, als der Nenner (/ die Edukte). Das Gleichgewicht liegt auf der Seite der Produkte (hier C und D).

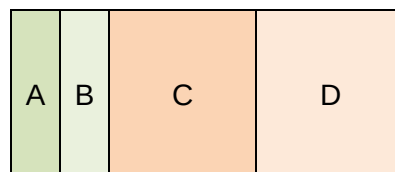
Die Stoffmengen der Produkte überwiegen die der Edukte. Bei Gas-Reaktionen können wir uns die Anteile auch als Volumen vorstellen.

Bei Konstanten, die größer als  $10^4$  sind, können wir sogar feststellen, dass sie zu über 99 % auf der Seite der Reaktions-Produkte liegen.

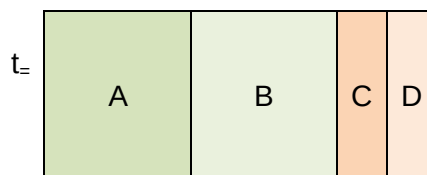
vor Reak.



im Gleichgew.

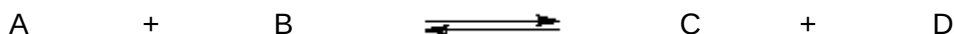
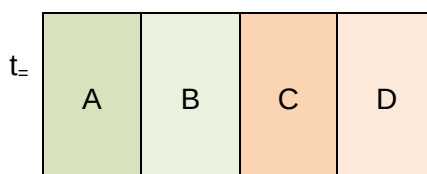


Bei einem Gleichgewichts-Konstante  $K_c < 1$  ist dagegen die Seite der Edukte bevorteilt. Jetzt ergibt sich der Quotient aus dem kleineren Produkt (der Reaktions-Produkte) und dem großen Produkt (der Ausgangsstoffe). Ist der Wert der Konstanten kleiner als  $10^{-4}$ , dann kann man sagen, dass die Reaktion nur zu weniger als 1% abgelaufen ist. Über 99 % der Stoffe sind auf der Seite der Edukte (hier A und B) zu finden.



Im unwahrscheinlichen Fall, dass die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten gleich groß sind – also quasi im stöchiometrischen (Modell-)Gleichgewicht die Edukte und die Produkte gleich konzentriert sind, dann beträgt  $K_c = 1$ .

Alle Stoffe unserer Modell-Reaktion wären dann gleichverteilt.



Bezogen auf die Stoffmengen heißt dies, dass die Ausgangsstoffe und die Reaktions-Produkte ungefähr im gleichen Verhältnis zueinander vorliegen.

Typische Beispiele für Reaktion des Modell-Typs  $A + B \rightleftharpoons C + D$  sind:

Iod-Wasserstoff-Gleichgewicht:



Veresterung von Ameisensäure mit Methanol / Bildung von Methansäuremethylester:



Reaktion von Fluorwasserstoff mit Wasser / Bildung von Fluorwasserstoffsäure:



Die folgende Reaktion ist ein im Labor sehr häufig untersuchtes Gleichgewicht:



Das liegt vor allem daran, dass man bei gut zu beherrschenden Temperaturen Gleichgewichte erhält, in denen alle Stoffe in messbaren Konzentrationen vorkommen.

bei  $\vartheta = 490 \text{ }^\circ\text{C}$

| Anfangs- / Start-Konzentration<br>$c_0 \text{ [mol/l]}$ |              |             | Gleichgewichts-Konzentration<br>$c \text{ [mol/l]}$ |              |             | $K_c$        |
|---------------------------------------------------------|--------------|-------------|-----------------------------------------------------|--------------|-------------|--------------|
| $\text{H}_2$                                            | $\text{I}_2$ | $\text{HI}$ | $\text{H}_2$                                        | $\text{I}_2$ | $\text{HI}$ |              |
| 1,00                                                    | 1,00         | 0,00        | 0,228                                               | 0,228        | 1,544       | 45,86        |
| 2,00                                                    | 2,00         | 0,00        | 0,457                                               | 0,457        | 3,086       | 45,60        |
| 0,00                                                    | 0,00         | 2,00        | 0,229                                               | 0,229        | 1,542       | 45,34        |
| 0,00                                                    | 0,00         | 1,00        | 0,114                                               | 0,114        | 0,771       | 45,74        |
| 1,00                                                    | 0,00         | 1,00        | 1,020                                               | 0,020        | 0,960       | 45,18        |
| Durchschnitt:                                           |              |             |                                                     |              |             | <b>45,54</b> |

Da Reaktions-Geschwindigkeiten i.A. von der Temperatur abhängen, darf hier der Hinweis nicht fehlen, dass die allgemeinen Konstanten nur für  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (also Standard-Bedingungen) oder eine spezielle Temperatur gelten.

Für andere Reaktions-Schemata (z.B.:  $\text{A} + \text{B} \rightleftharpoons \text{C}$ ) muss das MWG jeweils angepasst werden, Es gilt, dass sich die Konzentrations-bezogene Gleichgewichts-Konstante  $K_c$  aus dem Quotienten des Produktes der Konzentrationen der Reaktions-Produkte und des Produktes der Konzentrationen der Edukte ergibt.

$$K_c = \frac{c_{P1}^{n_{P1}} \cdot c_{P2}^{n_{P2}} \cdot \dots \cdot c_{Pn}^{n_{Pn}}}{c_{E1}^{n_{E1}} \cdot c_{E2}^{n_{E2}} \cdot \dots \cdot c_{En}^{n_{En}}}$$

Etwas universeller ist ein Term über die Produkt-Formeln:

$$K_c = \frac{\prod c_{RP}}{\prod c_{AS}}$$

Für Massenwirkungs-Gleichungen mit gleich vielen Stoffmengen-Konzentrationen auf der Produkte-, wie auch der Edukte-Seite, sind Einheiten-los. Für andere Gleichungs-Typen ergeben sich andere Einheiten. Allgemein lässt sich die Einheit mit der Formel:

$$[\text{mol/l}]^{c+d-a-b} \quad \text{für:} \quad a \text{ A} + b \text{ B} \rightleftharpoons c \text{ C} + d \text{ D}$$

bestimmen. Natürlich erhalten wir diese Einheit auch beim ordentlichen Einsetzen in das MWG oder beim separaten Ableiten neben der reinen Zahlen-Rechnung.

**Hat das MWG nun eigentlich überhaupt was mit Massen zu tun? Woher kommt der Name?**

Konzentrationen an sich sind schwer zu messen. Da klappt eventuell für farbige Stoffe über Absorptions-Messungen oder Äquivalenz-Messungen a'la Titrations. Vor dem Problem standen auch GULDBACH und WAAGE.

---

Relativ einfach – und dabei auch noch recht genau – ist von alters her die Masse-Bestimmung. Also wurde zuerst auch auf die Masse gesetzt.

Die Verwendung der Masse ist auch kein Problem, da die folgenden Beziehungen:

$$c = \frac{n}{V} \qquad n = \frac{m}{M}$$

zu folgendem MWG führen:

$$K_c = \frac{\frac{m_C}{M_C \cdot V} \cdot \frac{m_D}{M_D \cdot V}}{\frac{m_A}{M_A \cdot V} \cdot \frac{m_B}{M_B \cdot V}}$$

Da die molaren Massen unabhängig und konstant sind, können sie zu einer Konstante zusammengefasst werden. Das Volumen aller Stoffe ergibt ein gemeinsames Volumen (- wir befinden uns ja in einem abgeschlossenen System -). Da dieses Volumen in allen Teilausdrücken auftaucht, kann es raus gekürzt werden. Es bleibt eine Formel, in der praktisch die Massen-Produkte zueinander im Verhältnis stehen.

### **Aufgaben:**

- 1. Kann man eigentlich auch ein chemisches Gleichgewicht in einem geschlossenen System beobachten? Stellen Sie eine Hypothese auf und erläutern Sie diese!***
- 2. Recherchieren Sie, wie das Massenwirkungs-Gesetz ursprünglich formuliert war und klären Sie die enthaltenen Größen und Rechen-Operationen auf!***



Mit dem MWG können wir nun auch prüfen, ob sich ein Stoff-Gemisch im chemischen Gleichgewicht befindet.

Haben wir die jeweiligen Konzentrationen und den Zielwert der Gleichgewichtskonstanten vorliegen, dann reicht die Berechnung des aktuellen Wertes der Konstanten aus, um diese dann mit dem Zielwert zu vergleichen. Sind beide Werte (annähernd) gleich, dann befindet sich das Gemisch im chemischen Gleichgewicht.

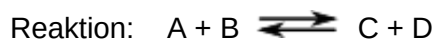
Weichen die Konstanten voneinander ab, ist das Gas-Gemisch erst auf dem Weg zum Gleichgewicht.

In unserem Beispiel ist die aktuelle Geschwindigkeits-Konstante (besser das aktuelle Geschwindigkeits-Verhältnis) kleiner als die Gleichgewichtskonstante.

Das bedeutet, dass das System noch nicht im Gleichgewicht ist. Wenn man die Betrachtungen von [Vorhersage der Reaktions-Richtung](#) mit beachtet, dann ist die kleinere Geschwindigkeits-Konstante ein Zeichen für Tendenz System's sich von der Ausgangsstoff-Seite in Richtung Gleichgewicht zu bewegen.

Ein anderes Problem ist die Bestimmung von Stoff-Konzentrationen im Gleichgewicht. In stöchiometrischen Gemischen reicht uns die Kenntnis einer oder mehrerer Stoff-Konzentrationen, um andere zu berechnen.

Diese Berechnungen werden im Abschnitt [Vorschlag eines Lösungs-Schema's für Berechnungen zum chemischen Gleichgewicht](#) Schritt-weise vorgestellt, weil sie doch recht komplex sind.



geg.:  $c[A]=0,192 \text{ mol/l}$

$$c[B]=0,083 \text{ mol/l}$$

$$c[C]=0,601 \text{ mol/l}$$

$$c[D]=0,601 \text{ mol/l}$$

$$K_c = 90 \text{ (TW)}$$

ges.:  $K_{akt}$

Lösung:

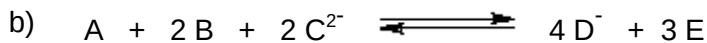
$$K_{akt} = \frac{c[C] \cdot c[D]}{c[A] \cdot c[B]} = \frac{0,601 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot 0,601 \frac{\text{mol}}{\text{l}}}{0,192 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot 0,083 \frac{\text{mol}}{\text{l}}}$$

$$K_{akt} = 22,7$$

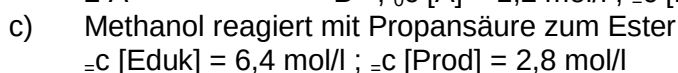
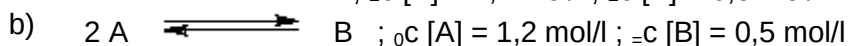
$$K_{akt} < K_c$$

### Aufgaben:

1. Stellen Sie das MWG für die Reaktion von Fluorwasserstoff mit Wasser auf!
2. Entwickeln Sie die Reaktions-Gleichung für die Reaktion von Ethan mit Brom und stellen Sie das zugehörige MWG auf!
3. Geben Sie die Massenwirkungs-Gesetze für die folgenden Reaktionen an!



4. Berechnen Sie die Gleichgewichts-Konstante für das Gleichgewicht:



5. Ermitteln Sie die Gleichgewichts-Konzentration für Methanol innerhalb der Bildungs-Reaktion von Methansäuremethylester aus Methansäure und Methanol! Das Ester und das Wasser haben jeweils eine Konzentration von 5,7 mol/l

6. Prüfen Sie, ob sich das folgende Gas-Gemisch im Gleichgewicht befindet!

$$c[CO] = 2,4 \text{ mol/l} \quad c[CO_2] = 1,8 \text{ mol/l} \quad c[H_2] = 4,3 \text{ mol/l} \quad c[H_2O] = 6,9 \text{ mol/l}$$

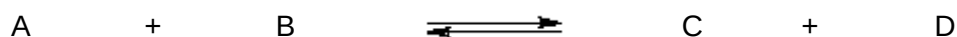
7. Sind die folgenden Massenwirkungs-Gesetze exakt? Begründen Sie Ihre Meinung!

a)  $K_c = \frac{c[H_2O]}{c[H_2] \cdot c[O_2]}$

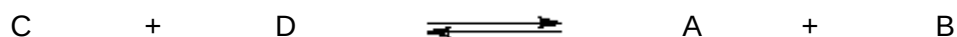
b)  $K_c = \frac{c[SO_3]}{c[SO_2] \cdot 0,5 c[O_2]}$

c)  $K_c = \frac{c[\text{Oxalsäurediethylester}] \cdot c[\text{Wasser}]^2}{c[\text{Oxalsäure}]^2 \cdot c[\text{Ethanol}]}$

Betrachtet man für eine Reaktion: (z.B. Bildungs-Reaktion von C und / oder D)



die Rück-Reaktion: (z.B.: zugehörige Zersetzungs-Reaktion von C und / oder D)



dann ergibt sich eine neue Berechnung des MWG. Praktisch sind Edukte und Produkte getauscht. Das Ergebnis ist eine andere Konzentrations-bezogene Gleichgewichts-Konstante – eben die für die Rück-Reaktion. Beide Konstanten verhalten sich reziprok zueinander, d.h. die Konstante für z.B. das Bildungs-Gleichgewicht ist gleich dem Kehrwert der Konstanten von der zugehörigen Zersetzungs-Gleichgewicht. Kennen wir den einen Wert, können wir uns den anderen leicht berechnen.

## Abwandlungen des Massenwirkungs-Gesetz



Vor allem in Gas-Gemischen sind die Konzentrationen der einzelnen Stoffe schwierig zu ermitteln. Mittels spezieller Sensoren sind aber z.B. die Anteile der Einzel-Gase zugänglich. Solche Sensoren messen den Partial-Druck eines Gases.

Der Partial-Druck eines Stoffes – üblicherweise nur für Gase betrachtet – gibt seinen Anteil am Gesamt-Druck des Stoff-Gemisches wieder.

$$p_{ges} = p_i [A] + p_i [B] + \dots + p_i [Z]$$

Um nicht mehrfach zu induzieren, verwende ich hier die alternative Schreibweise, bei der die Stoffe jeweils hinter den Formel-Zeichen in eckige Klammern geschrieben werden. Vor allem, wenn man mit größeren Stoff-Formeln arbeiten muss, dann bietet sich diese Schreibweise aus Gründen der Übersichtlichkeit an.

Ohne weiteres können wir aber nicht Konzentration und Partial-Druck gegeneinander austauschen. Vielmehr suchen wir eine Beziehung, die eine Umrechnung von Konzentration und Partial-Druck erlaubt.

Die Konzentration ist als Quotient aus Stoffmenge und Volumen definiert:

$$c = \frac{n}{V}$$

Bei der Suche einer Formel für Drücke, die einen Bezug zur Konzentration oder zu ihren Definitions-Größen beinhaltet, findet sich im Tafelwerk die Zustands-Gleichung idealer Gase:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Stellen wir diese nun so um, dass wir den Quotienten aus Stoffmenge und Volumen anziehen, dann bekommen wir:

$$\frac{n}{V} = \frac{p}{R \cdot T}$$

In diesen Term ersetzen wir nun  $n/V$  durch die Konzentration und erhalten die Formel:

$$c = \frac{p}{R \cdot T}$$

Nach dem Umschreiben ergibt die Proportionalitäts-Gleichung:

$$c = \frac{1}{R \cdot T} \cdot p$$

Es gibt also eine Umrechnungs-Möglichkeit zwischen Konzentration und Druck. Der Umrechnungsfaktor ist für eine Reaktion / eine Temperatur konstant und kann vor dem Einsetzen in das MWG bestimmt werden.

Setzen wir nun statt der Konzentration den Partial-Druck eines Stoffes in das MWG ein, erhalten wir (für die Modell-Gleichung  $A + B \rightleftharpoons C + D$ ):

$$K = \frac{\frac{1}{R \cdot T} p_i [C] \cdot \frac{1}{R \cdot T} p_i [D]}{\frac{1}{R \cdot T} p_i [A] \cdot \frac{1}{R \cdot T} p_i [B]}$$

---

Diese Gleichgewichts-Konstante ist jetzt aber nicht Konzentrations-bezogen. Wir müssen eine neue – Druck-basierte – definieren.

$$K_p = \frac{\frac{1}{R \cdot T} p_i [C] \cdot \frac{1}{R \cdot T} p_i [D]}{\frac{1}{R \cdot T} p_i [A] \cdot \frac{1}{R \cdot T} p_i [B]}$$

Natürlich fällt gleich auf, dass unser Proportionalitäts-Faktor (1/RT) recht häufig im MWG vorkommt und sich unter Umständen rauskürzen lässt. Das muss aber für jeden Ansatz genau geprüft werden. Für unsere Modell-Gleichung können wir alle Faktoren rauskürzen. Es bleibt eine Formel übrig, welche die Berechnung einer Gleichgewichts-Konstanten ermöglicht, die auf den Partial-Drücke der EinzelGase basiert.

$$K_p = \frac{p_i [C] \cdot p_i [D]}{p_i [A] \cdot p_i [B]}$$

K<sub>c</sub> und K<sub>p</sub> unterscheiden sich ein wenig, können aber ineinander umgerechnet werden.

$$K_c = K_p \cdot \frac{1}{R \cdot T}$$

### **Berechnungen im chemischen Gleichgewicht**

Reaktions-Quotient RQ oder Q als Quotient aus dem Produkt der Ausgangs-Konzentrationen der Reaktions-Produkte und dem Produkt der Ausgangs-Konzentrationen der Ausgangs-Stoffe

für die Partial-Drücke ist der Ausdruck äquivalent

zur sicheren Unterscheidung von der Wärmemenge Q verwende ich hier Q<sub>c</sub> und Q<sub>p</sub> je nach Werte-Quelle.

$$Q_c = \frac{\prod {}_0c [Prod]}{\prod {}_0c [Eduk]} \quad Q_p = \frac{\prod {}_0p_i [Prod]}{\prod {}_0p_i [Eduk]}$$

im Vergleich dazu nochmal die die Gleichgewichts-Konstanten:

$$K_c = \frac{\prod {}_c [Prod]}{\prod {}_c [Eduk]} \quad K_p = \frac{\prod {}_p p_i [Prod]}{\prod {}_p p_i [Eduk]}$$

Gleichgewichts-Ausdruck (MWG-Formel) mit eingesetzten Ausgangs-Konzentrationen bzw. Partialdrücken

---

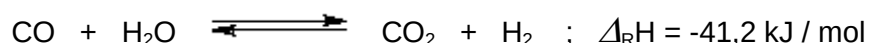
## Lösungs-Schema für Berechnungen zum chemischen Gleichgewicht

### Beispiel-Aufgabe:

*Beim Wassergas-Gleichgewicht reagieren Kohlenmonoxid und Wasserdampf zu Kohlendioxid und Wasserstoff. Die Konzentrations-Gleichgewichtskonstante beträgt 3. Berechnen Sie die Gleichgewichts-Konzentrationen für alle Reaktions-Produkte, wenn man von jeweils 3 mol/l der Ausgangsstoffe ausgeht!*

### 1. Aufstellen der chemischen Gleichung

**Wassergas-Gleichgewicht** (Wassergas-Shift-Reaktion (WGS); Wassergas-Konvertierungs-Reaktion; Kohlenoxid-Konvertierung)



### 2. Analyse der gegebenen und gesuchten Größen

geg.:  ${}_0c[\text{CO}] = 3 \text{ mol/l}$   
 ${}_0c[\text{H}_2\text{O}] = 3 \text{ mol/l}$   
 $K_c = 3$

ges.:  ${}_ec[\text{CO}_2]$   
 ${}_ec[\text{H}_2]$

### 3. Finden der Berechnungs-Gleichung

Da Gleichgewichts-Konzentrationen gesucht werden, aber nur Ausgangs-Konzentrationen gegeben sind, müssen wir auf das Massenwirkungs-Gesetz zurückgreifen. Es ist praktisch die einzige Formel zur Berechnung von Gleichgewichts-Konzentrationen. Dafür spricht auch, dass wir eine Gleichgewichts-Konstante unter den gegebenen Werten zur Verfügung haben.

$$K_c = \frac{c[\text{CO}_2] \cdot c[\text{H}_2]}{c[\text{CO}] \cdot c[\text{H}_2\text{O}]}$$

Das Problem ist aber, dass wir nur Ausgangs-Konzentrationen gegeben haben. Wir müssen also versuchen, uns die Gleichgewichts-Konzentrationen aus diesen heraus abzuleiten. Die Struktur chemischer Gleichungen sowie unser allgemeines Wissen über Reaktions-Verläufe ermöglicht es uns, viele zusätzliche Sachverhalte in die Berechnungen einfließen zu lassen. Z.B. wissen wir, dass in "normalen" Reaktionen zu Anfang kein Reaktions-Produkt vorhanden ist.

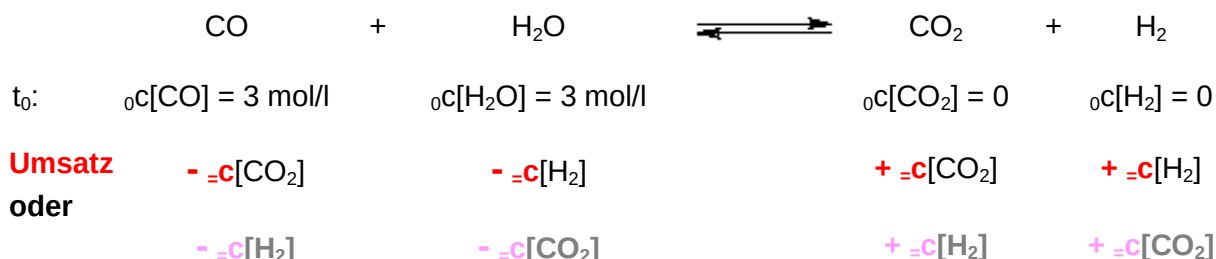
### 4. Charakterisieren der Ausgangs-Situation



Sollten zu Anfang z.B. schon Reste von Reaktions-Produkten vorhanden sein, dann können diese hier gleich eingetragen werden.

## 5. Beschreiben der Veränderungen

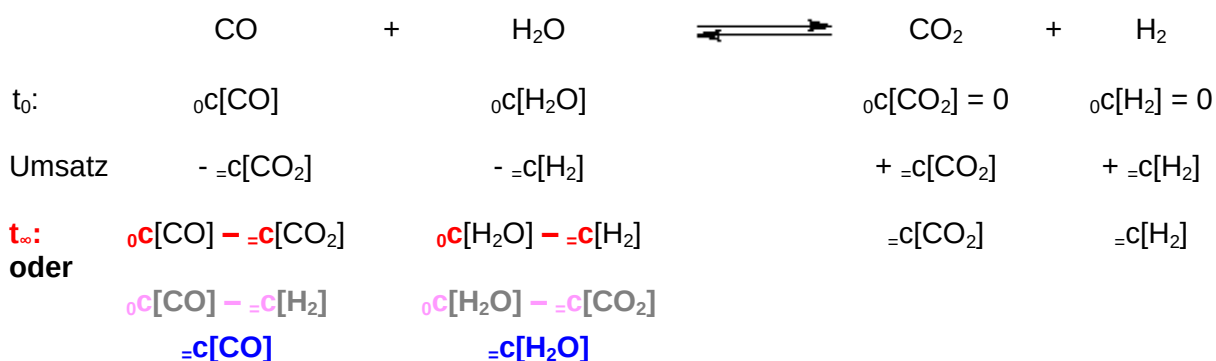
Nun kennzeichnen wir die Veränderungen, die sich für die einzelnen Konzentrationen ergeben. Die Gleichgewichts-Konzentrationen der Reaktions-Produkte können bei gleicher Stöchiometrie frei ausgetauscht werden.



Die aufgehellten Elemente sind Alternativen. In den weiteren Schemata-Schritten werden wir sie hier nicht mitschleppen.

## 6. Charakterisieren der Gleichgewichts-Situation

In diesem Schritt legen wir nun Formeln für die Berechnung der Gleichgewichts-Konzentrationen für das MWG fest. Die Konzentrationen für die Reaktions-Produkte sind in dieser Aufgaben-Konstellation klar. Anders sieht es bei den Edukten aus. Für sie müssen wir Differenzen bilden.



Die Differenzen werden dann später für die Gleichgewichts-Konzentrationen (**blau** gekennzeichnet) ins MWG eingesetzt.

## 7. Reduktion auf wenige Variablen (Konzentrationen)

Eine wichtige Aufgabe ist es nun die Anzahl der Variablen zu reduzieren. Bei Reaktionen können wir von stöchiometrischen Umsätzen ausgehen. Dabei spielen ev. Überschüsse von einem Stoff zuerst einmal keine Rolle.

Man erkennt z.B., dass die Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff in unserem Gleichgewicht genau gleich groß sind.

$$t_{\infty}: \quad {}_0c[\text{CO}] - {}_c[\text{CO}_2] \quad {}_0c[\text{H}_2\text{O}] - {}_c[\text{H}_2] \quad {}_c[\text{CO}_2] \quad = \quad {}_c[\text{H}_2]$$

Sie werden zur Variable  ${}_c[\text{RP}]$  vereinfacht:

$$t_{\infty}: \quad {}_0c[\text{CO}] - {}_c[\text{CO}_2] \quad {}_0c[\text{H}_2\text{O}] - {}_c[\text{H}_2] \quad {}_c[\text{RP}] \quad {}_c[\text{RP}]$$

Diese können wir nun auch in die Differenzen bei den Ausgangsstoffen einsetzen. Außerdem erkennen wir die Gleichheit der Variablen für beide Ausgangsstoffe (siehe auch Schritte 3 bzw. 4).

$$t_{\infty}: \quad {}_0c[\text{CO}] - {}_c[\text{CO}_2] \quad = \quad {}_0c[\text{H}_2\text{O}] - {}_c[\text{H}_2] \quad {}_c[\text{RP}] \quad {}_c[\text{RP}]$$

Somit ergibt sich insgesamt:

$$t_{\infty}: \quad {}_0c[\text{AS}] - {}_c[\text{RP}] \quad {}_0c[\text{AS}] - {}_c[\text{RP}] \quad {}_c[\text{RP}] \quad {}_c[\text{RP}]$$

Um die Effektivität der Variablen-Reduktion beurteilen zu können, setzen wir gleich hier die bekannt Größen ein. Praktisch benötigen wir ja einen Therm mit nur noch einer Variablen.

$$t_{\infty}: \quad 3 \text{ mol/l} - {}_c[\text{RP}] \quad 3 \text{ mol/l} - {}_c[\text{RP}] \quad {}_c[\text{RP}] \quad {}_c[\text{RP}]$$

$$\quad {}_c[\text{CO}] \quad {}_c[\text{H}_2\text{O}]$$

## 8. eigentliche Berechnungen

Und das ist uns gelungen. Nun tragen wir die Ausdrücke in das MWG ein. Die Ausdrücke für das Produkt der Ausgangsstoffe sind nochmals **blau** gekennzeichnet:

$$K_c = \frac{{}_c[\text{CO}_2] \cdot {}_c[\text{H}_2]}{{}_c[\text{CO}] \cdot {}_c[\text{H}_2\text{O}]}$$

$$K_c = \frac{{}_c[\text{RP}] \cdot {}_c[\text{RP}]}{\left(3 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot {}_c[\text{RP}]\right) \cdot \left(3 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot {}_c[\text{RP}]\right)}$$

Der Einfachheit halber setzen wir auch gleich den bekannten Wert für  $K_c$  ein und multiplizieren den gesamten Nenner auf die linke Seite:

$$3 \cdot \left(3 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot {}_c[\text{RP}]\right) \cdot \left(3 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot {}_c[\text{RP}]\right) = {}_c[\text{RP}]^2$$

Spätestens jetzt bietet sich eine Umbenennung der sperrigen Variable  ${}_c[\text{RP}]$  z.B. in  $x$  um. Das geübte mathematische Auge sieht ja schon, dass der Ausdruck auf eine quadratische Funktion herausläuft und mit der passenden Lösungs-Formel berechnet werden muss. Desweiteren merken wir uns die Einheit mol/l und lassen sie in den folgenden Berechnungen weg:

$$3 \cdot (3 - x) \cdot (3 - x) = x^2$$

Das sieht wesentlich übersichtlicher aus. Nun bleibt uns das Ausmultiplizieren der beiden Konzentrations-Ausdrücke der linken Seite über die binomische Formel:

$$3 \cdot (x^2 - 6x + 9) = x^2$$

$$3x^2 - 18x + 27 = x^2$$

---

Das Umstellen in die Normal-Form (und Tauschen der Seiten) ergibt:

$$0 = 2x^2 - 18x + 27$$

$$0 = x^2 - 9x + 13,5$$

$$x_{1,2} = -\frac{p}{2} \mp \sqrt{\frac{p^2}{4} - d} = -\frac{-9}{2} \mp \sqrt{\frac{81}{4} - 13,5}$$

$$x_1 = 1,901$$

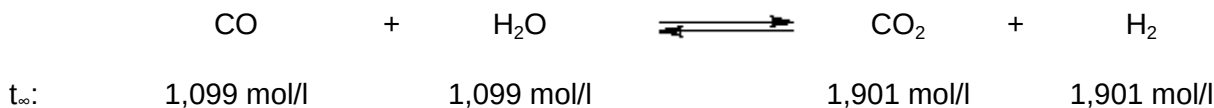
$$x_2 = 7,098$$

In chemischen Gleichgewichten ist immer nur eine der Lösungen brauchbar. Hier ist das  $x_1$ , da  $x_2$  gar nicht möglich ist. Bei einer Reaktion, die durch einen teilweisen Verbrauch von Ausgangsstoffen charakterisiert ist, kann – natürlich unter Berücksichtigung der Stöchiometrie – keine höhere Konzentration, als die Ausgangs-Konzentration, herauskommen. Auch die nachfolgenden Berechnungen zu den Ausdrücken der Ausgangsstoffe würden zu negativen Konzentrationen führen.

Die Variable  $x_1$  steht ja direkt für die Gleichgewichts-Konzentration  $c[\text{RP}]$  jedes Reaktions-Produktes. Die Ausgangsstoff-Konzentrationen berechnen wir über den Ausdruck:

$$3 \frac{\text{mol}}{\text{l}} - x_1 = 3 \frac{\text{mol}}{\text{l}} - 1,901 \frac{\text{mol}}{\text{l}} = 1,099 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

Zusammengefasst auf unsere Reaktions-Gleichung stellt sich das dann so dar:



## 9. Probe (fakultativ)

Der skeptische Chemiker / Mathematiker würde vielleicht noch mal prüfen, in dem er die gerade berechneten Gleichgewichts-Konzentrationen ins MWG einsetzt:

$$K_c = \frac{1,901 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot 1,901 \frac{\text{mol}}{\text{l}}}{1,099 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot 1,099 \frac{\text{mol}}{\text{l}}} = 2,992$$

Die geringe Abweichung zum gegebenen  $K_c = 3$  können wir sicher tolerieren.



### Aber geht das nicht einfacher?

Ja schon. In der Schulchemie findet man das folgende vereinfachte Schema. Dabei werden Werte gleich eingesetzt oder als einfache Variablen geführt (hier: a und b als Ausgangskonzentrationen) und der Umsatz mit x und ev. noch mit y bezeichnet:

|              | A     | + | B     | $\rightleftharpoons$ | C     | + | D     |
|--------------|-------|---|-------|----------------------|-------|---|-------|
| $t_0$ :      | a     |   | b     | mol/l                | 0     |   | 0     |
| Umsatz       | - x   |   | - x   |                      | + x   |   | + x   |
| $t_\infty$ : | a - x |   | b - x |                      | x     |   | x     |
|              | =c[A] |   | =c[B] |                      | =c[C] |   | =c[D] |

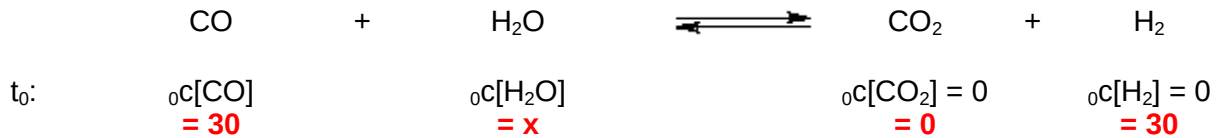
Bei veränderten Ansätzen oder Ausgangs-Bedingungen muss man natürlich genau überlegen, was sich wie verändert.

### Aufgaben:

1. *Geben Sie für jeden mathematischen Schritt in der vorseitigen Berechnungs-Folge die Rechen- bzw. Umstellungs-Operation (von Zeile zu Zeile) an!*
2. *Bei der Veresterung von Essigsäure mit Ethanol hat man die Gleichgewichts-Konstante 4 ermittelt. Berechnen Sie die Gleichgewichts-Konzentrationen von Essigsäureethylester und Wasser, wenn von einer 17 M Essigsäure und 17 M Ethanol ausgegangen wurde! (je RP: 11,33 M)*
3. *Die Veresterung von Propanol mit Propansäure soll mit jeweils 0,2 l konzentrierter Lösung durchgeführt werden. Die Gleichgewichts-Konstante beträgt bei Standard-Bedingungen 4,2. Berechnen Sie alle Gleichgewichts-Konzentrationen! ( $c_0[\text{Propanol}] = 13,29 \text{ M}$ ;  $c_0[\text{Propansäure}] = 13,33 \text{ M}$ ;  $c_{\text{e}}[\text{Propanol}] = 4,345 \text{ M}$ ;  $c_{\text{e}}[\text{Propansäure}] = 4,385 \text{ M}$ ;  $c_{\text{e}}[\text{Propansäurepropylester}] = 8,945 \text{ M}$ ;  $c_{\text{e}}[\text{Wasser}] = 8,945 \text{ M}$ )*

Ein weiteres Rechen-Beispiel könnte so aussehen:

Ein Gas-Gemisch enthält jeweils 30 mol Kohlendioxid und Wasserstoff. Durch zusätzlichen Einsatz von Wasser(-Dampf) soll nun das Gleichgewicht so beeinflusst werden, dass 90% des Kohlenmonoxid's aus dem Gleichgewicht entfernt werden. Die Arbeits-Temperatur liegt bei 900 °C und die Gleichgewichts-Konstante ist dort mit 3 ermittelt worden.



Laut der Zielstellung soll 90 % des CO entfernt werden. Diese (Gleichgewichts-)Konzentration berechnen wir zuerst.

In den obigen Grund-Ansatz arbeiten wir diesen Wert nun ein. Es ergeben sich dadurch notwendige Stoffmengen-Veränderungen. Was auf der Ausgangsstoff-Seite abgehen soll, muss im Gleichgewicht auf der Seite der Reaktions-Produkte zuge schlagen werden. Schließlich soll ja das Gleichgewicht durch die zusätzliche Gabe von Wasser-Dampf verschoben werden.

geg.:  $K_C = 3$  [900 K]  
 ${}_0c[\text{CO}], {}_0c[\text{H}_2] = 30 \text{ mol}$

ges.:  $=c[\text{CO}, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{H}_2]$

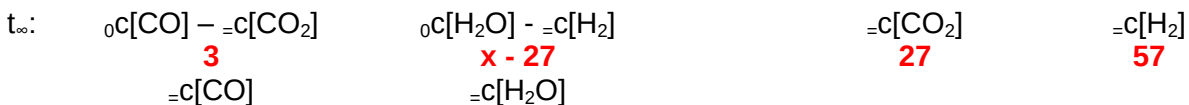
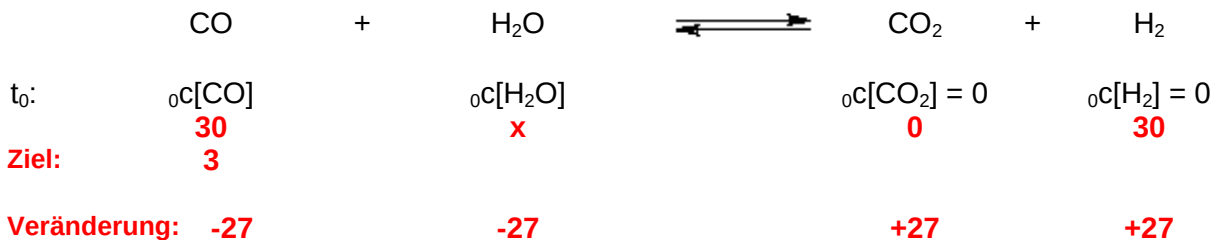
Lsg.:

CO:  $c_{-} = c_0 - c_0 \cdot 0,9$

$c_{-} = 30 - 30 \cdot 0,9$

$c_{-} = 30 - 27$

$c_{-} = 3$



Nun haben wir alle Angaben für das MWG zusammen.

Das Einsetzen, Umstellen und Ausrechnen ist hier sogar einfacher, da wir eine einfache lineare Funktion vorliegen haben.

Somit ergibt sich:

Um in einem Gas-Gemisch aus jeweils 30 mol CO und H<sub>2</sub> den CO-Gehalt um 90% zu reduzieren, müssen 198 mol Wasser-Dampf zugesetzt werden.

$$K_C = \frac{c[\text{CO}_2] \cdot c[\text{H}_2]}{c[\text{CO}] \cdot c[\text{H}_2\text{O}]}$$

$$K_C = \frac{27 \cdot 57}{3 \cdot (x-27)}$$

$$K_C = \frac{1539}{3x-81}$$

$$1539 = K_C \cdot (3x - 81)$$

$$1539 = 3 \cdot (3x - 81)$$

$$1539 = 9x - 243$$

$$1539 + 243 = 9x$$

$$9x = 1782$$

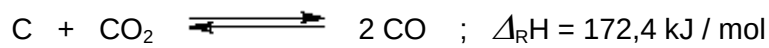
$$\underline{\underline{x = 198}}$$

---

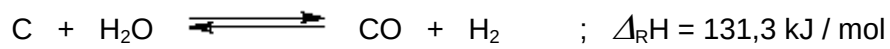
### Aufgaben:

1. Machen Sie die Probe zur obigen Berechnung!
2. Beim Wassergas-Gleichgewicht reagieren Kohlenmonoxid und Wasserdampf zu Kohlendioxid und Wasserstoff. Die Konzentrations-Gleichgewichts-Konstante beträgt 2,85. Berechnen Sie die Gleichgewichts-Konzentrationen für alle fehlenden Stoffe, wenn man 7,5 mol/l Kohlendioxid und 9,3 mol/l Wasser-Dampf im Gleichgewicht sowie 4,2 mol/l vom Kohlenmonoxid vorfindet! (14,84 mol/l)
3. Ein Wassergas-Gleichgewicht mit einer Gleichgewichts-Konstante von 2,83 wurde mit einem Synthesegas aus 1,2 mol/l Kohlenstoffdioxid, 14,8 mol/l Wasser-Dampf und 8,7 mol/l Kohlenstoffmonoxid gestartet. Berechnen Sie die Gleichgewichts-Konzentrationen! ( $\text{CO} = 2,16 \text{ M}$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 8,27 \text{ M}$ ;  $\text{CO}_2 = 7,74 \text{ M}$ ;  $\text{H}_2 = 6,54 \text{ M}$ )
4. Berechnen Sie die Gleichgewichts-Konstante für eine Reaktion, bei der 3 Ausgangsstoffe zu 2 Reaktionsprodukten reagieren, wenn die Ausgangsstoffe mit jeweils 3,1 mol/l und die Reaktionsprodukte mit jeweils 4,8 mol/l im Gleichgewicht gemessen wurden! (0,773 l/mol)
5. Bei der Reaktion von A und B zu C und D hat man eine Gleichgewichts-Konstante von 0,922 ermittelt. Durch einen Messfehler sind nur die Gleichgewichts-Konzentrationen von A mit 3,5 mol/l und D mit 2,2 mol/l bekannt. Berechnen Sie die fehlenden Gleichgewichts-Konzentrationen ( $\text{C} = 2,2 \text{ mol/l}$ ;  $\text{B} = 1,5 \text{ mol/l}$ ) sowie die Ausgangs-Konzentrationen im reinen Gemisch aus A und B ( $\text{A} = 5,7 \text{ mol/l}$ ;  $\text{B} = 3,7 \text{ mol/l}$ )!

## BOUDOUARD-Gleichgewicht (z.B. bei Kohle-Vergasung)

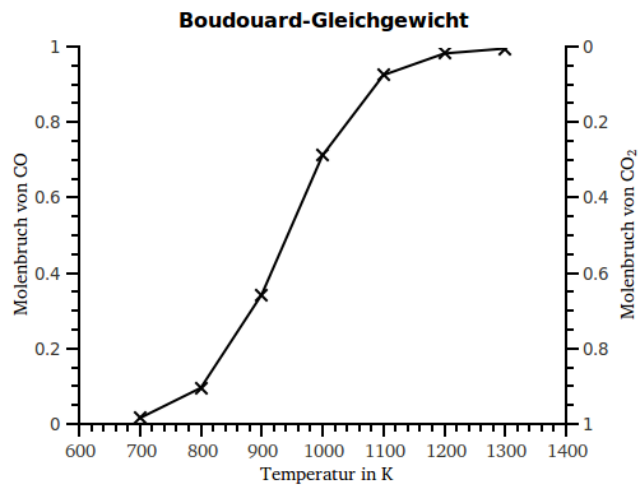


mit Teil-Reaktionen:



| T in °C | Anteil<br>CO <sub>2</sub> [%] | Anteil<br>CO [%] |  |
|---------|-------------------------------|------------------|--|
| 450     | 98                            | 2                |  |
| 600     | 77                            | 23               |  |
| 700     | 42                            | 58               |  |
| 800     | 6                             | 94               |  |
| 900     | 3                             | 97               |  |
| 1000    | 1                             | 99               |  |

p = 10 kPa

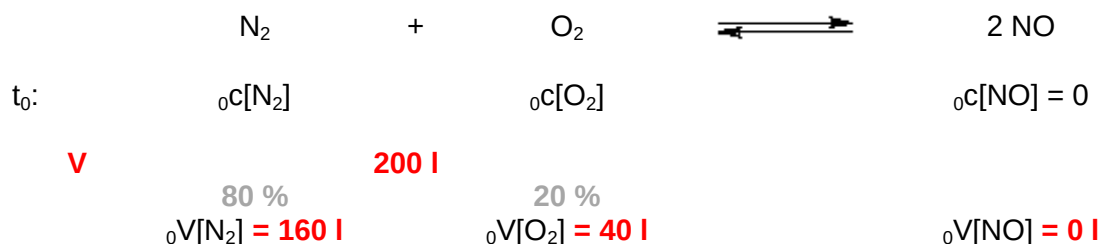


BOUDOUARD-Gleichgewicht bei 10 kPa  
Q: de.wikipedia.org (Chemcip)

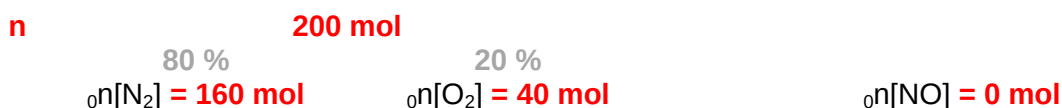
Betrachten wir als Nächstes eine Reaktion in der Luft:



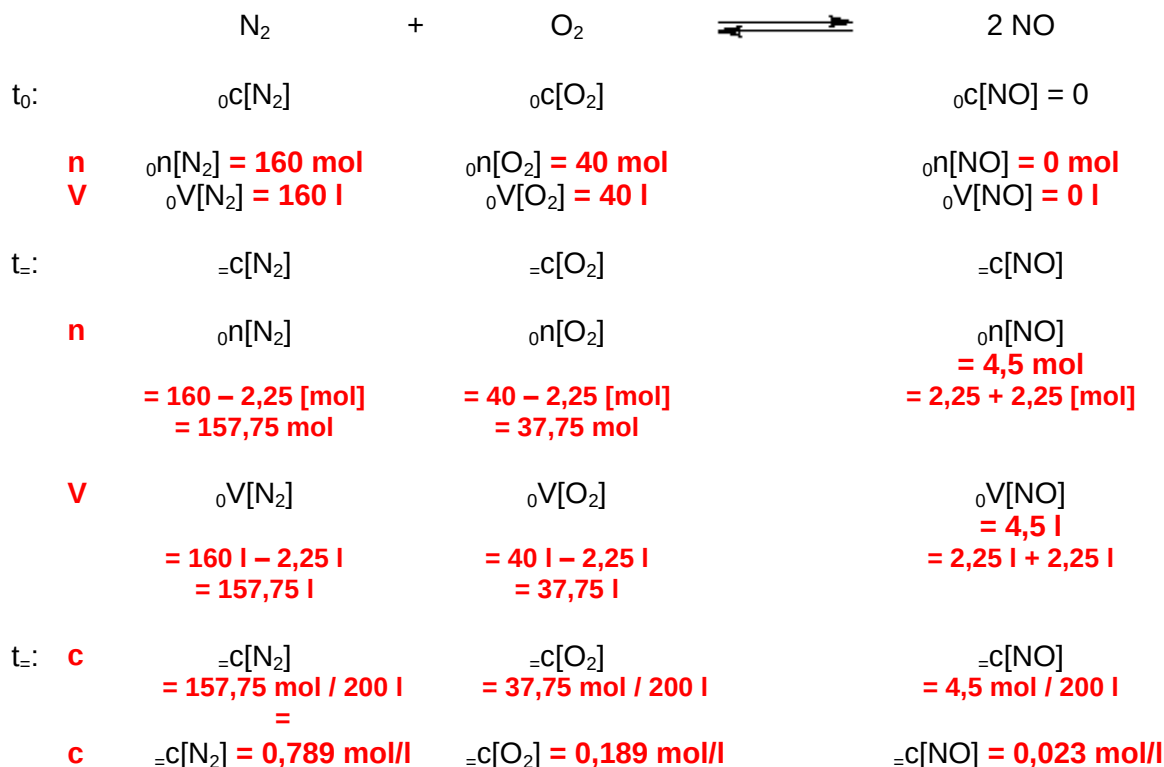
Die Luft soll nur aus Stickstoff und Sauerstoff bestehen und die beiden im klassischen Verhältnis von 80 % zu 20 % vorliegen. Andere Gase sind nicht vorhanden. In einem geschlossenen System werden bei rund 2500 °C in einem Volumen von 200 Liter Luft beobachtet:



Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Stoffmengen. Insgesamt enthalten die 200 Liter 200 mol Luft. Da Gase praktisch das gleiche Volumen bei gleicher Stoffmenge einnehmen, erhalten wir eine ähnliche Verteilung, wie für das Volumen:



Es kommt im Gleichgewicht zur Bildung von ungefähr 4,5 mol bzw. 4,5 Liter Stickstoffmonoxid. Dabei müssen wir natürlich beachten, dass das doppelte Volumen Stickstoffmonoxid entsteht, also in Wirklichkeit nur 2,25 mol (bzw. l) von den Ausgangsstoffen umgesetzt wurden:



Somit können wir das MWG aufstellen und  $K_c$  berechnen.

Der recht kleine Wert deutet auf einen geringen Umsatz hin. Mit anderen Worten, das Gleichge-

$$K_c = \frac{c[\text{NO}]^2}{c[\text{N}_2] \cdot c[\text{O}_2]}$$

---

wicht liegt auf der Seite der Ausgangsstoffe.  
Weiter vorne haben wir schon gesehen, dass man auch die Partial-Drücke bei Gas-Gleichgewichten für die Berechnung einer MWG-Konstanten benutzen kann. Auch die Stoffmengen konnten genutzt werden.

$$K_C = \frac{0,0225^2}{0,789 \cdot 0,189}$$

$$K_C = \frac{0,0005}{0,149}$$

$$\underline{K_c = 0,0034}$$

Eignen sich bei Gasen sich nun auch die Stoff-Volumina?

Setzt man diese ein, dann erhalten wir genau das gleiche Ergebnis. Sie nehmen ein gemeinsames Volumen ein, was zur Berechnung der Konzentrationen benutzt werden könnte. Vielfach kürzen sich die Volumen dann aber wieder heraus.

Bei Gasen sind also Konzentrationen, die Partial-Drücke, wie auch die partiellen Volumen oder die Stoffmengen gleichermaßen geeignet, um eine Gleichgewichts-Konstante zu bestimmen.

$$K_C = \frac{V[NO]^2}{V[N_2] \cdot V[O_2]}$$

$$K_C = \frac{4,5^2}{157,75 \cdot 37,75}$$

$$K_C = \frac{20,25}{5955,1}$$

$$\underline{K_c = 0,0034}$$

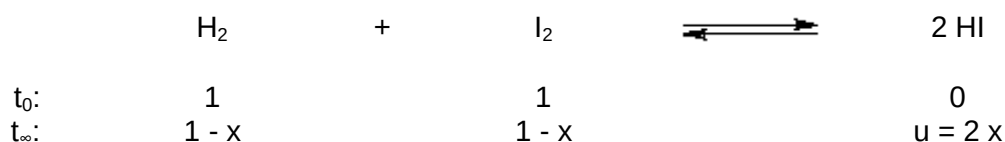
**interessante Links:**

<https://av.tib.eu/media/15706> (Video zum Berechnungs-Verfahren)

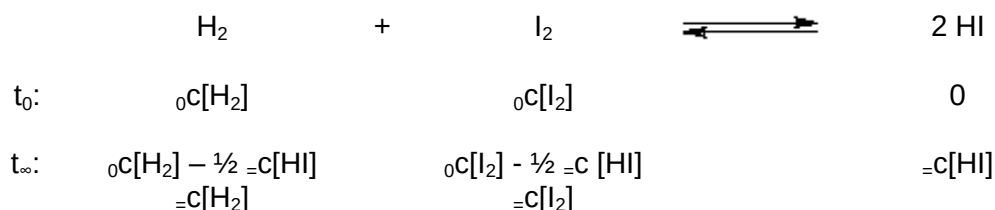
---

### Aufgaben:

1. Welche Stoffmenge von Propanol muss man einsetzen, um 12 mol Butansäure zu 70 % umzusetzen? Die Gleichgewichts-Konstante beträgt 2,3.
  2. Bei über 2'000 °C reagieren Stickstoff und Sauerstoff der Luft zu Stickstoffmonoxid. In den Reaktoren wird dazu gereinigte Luft verwendet, die neben Stickstoff noch 21 % Sauerstoff enthält. Aus 100 l Luft bilden sich im Gleichgewicht 2,1 l Stickstoffmonoxid, genauso, wie sich aus 100 mol Luft 2,1 mol NO bilden.
    - a) Berechnen Sie die Konzentrations-Gleichgewichts-Konstante!
    - b) Prüfen Sie, ob auch ein Einsetzen der Stoffmengen bzw. der Gas-Teil-Volumen ein vergleichbares Ergebnis erbringt!
  3. In einer Versuchs-Serie mit immer jeweils 3 mol Essigsäure sollen die maximal erreichbaren Ester-Stoffmengen vorberechnet werden. Die Serie startet mit 1 mol Ethanol. Bei den nachfolgenden Ansätzen wird immer jeweils 1 mol Ethanol mehr zugesetzt, bis man bei 10 mol angekommen ist. Es wird einheitlich bei 25 °C gearbeitet, wo der  $K_c$  mit 4 ermittelt wurde. Die verschlossenen Ansätze haben reichlich Zeit ein Gleichgewicht auszubilden. Stellen Sie die maximal möglichen Ester-Mengen in einem geeigneten Diagramm (kleinkariertes Papier reicht) dar! Interpretieren Sie das Diagramm!
- für die gehobene Anspruchsebene:
4. In einer abgewandelten Versuchserie soll der Effekt von unterschiedlichen Mengen Wasser (von 1 bis 10 mol in 1 mol-Schritten) untersucht werden. Der Vergleich-Versuch startet nur mit 3 mol Essigsäure und 3 mol Ethanol. Berechnen Sie die maximal möglichen Ausbeuten und erstellen Sie geeignetes Diagramm zur Veranschaulichung des Sachverhalts!



### Konzentrations-Ansatz:

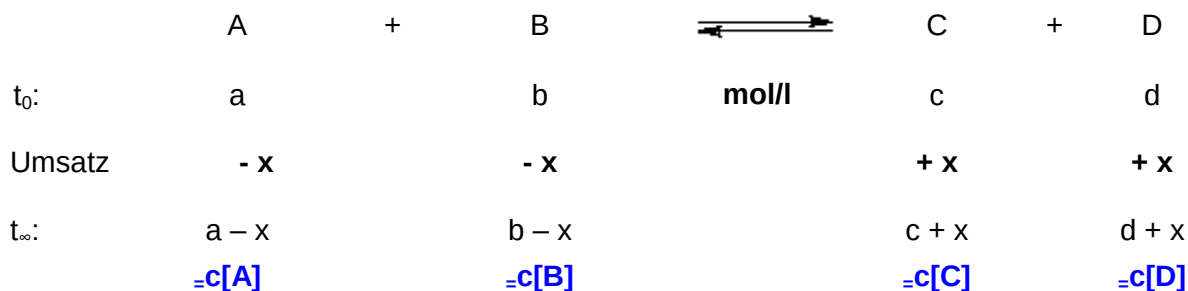


### für allgemeine Gleichung:

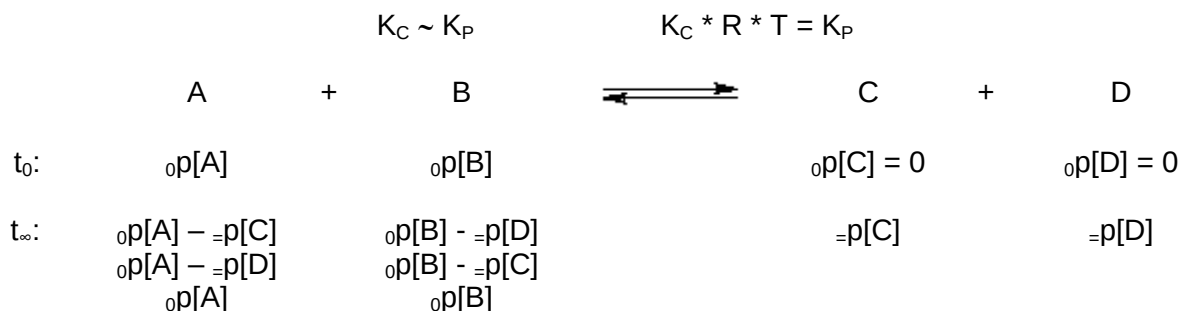


### vereinfachtes Schema

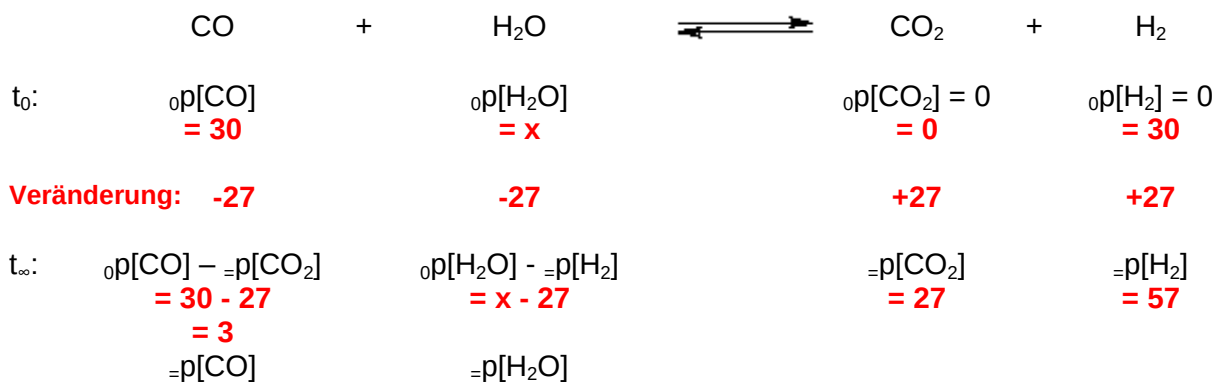
für Lösungs-Schema (→ [Lösungs-Schema für Berechnungen zum chemischen Gleichgewicht](#))



Einen praktisch äquivalenten Ansatz kann man auch über die Partial-Drücke in einem chemischen Gleichgewicht aufstellen (→ ).  $K_C$  und  $K_P$  stehen dabei in einem linearen Zusammenhang zueinander (→ [Beziehungen zwischen  \$K\_C\$  und  \$K\_P\$](#) ):



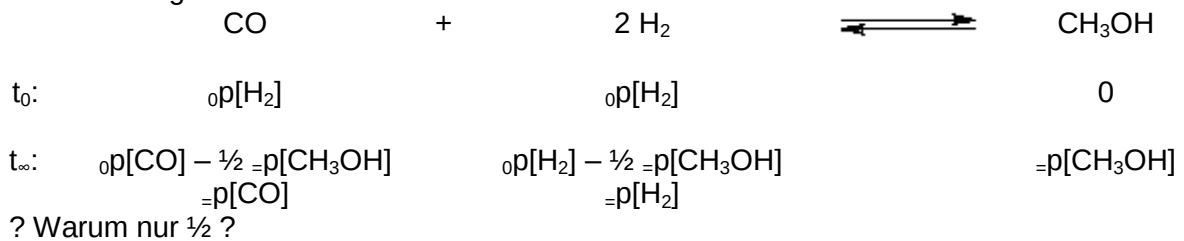




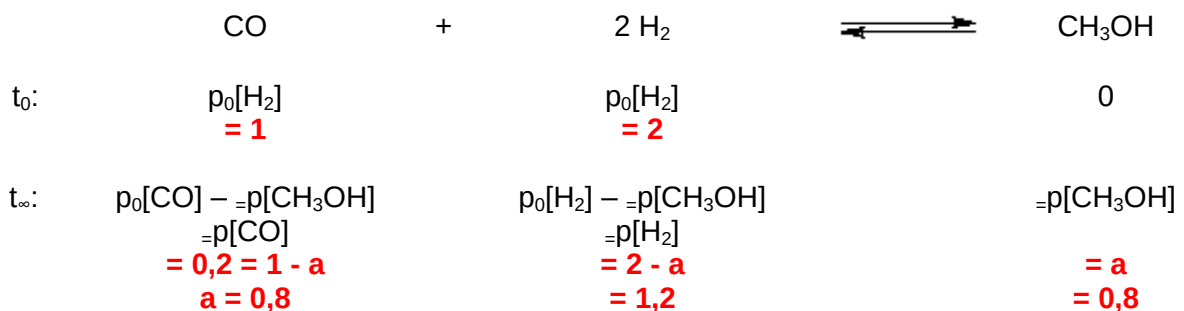
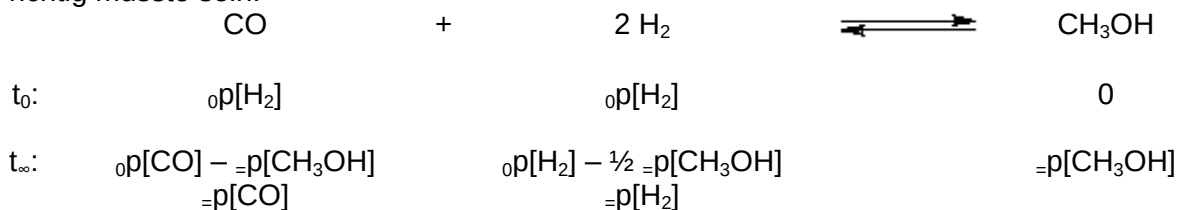
Betrachten wir die Berechnung einer Gleichgewichts-Konstanten aus den Partial-Drücken im Gleichgewicht.

Als Beispiel wählen wir hier die Methanol-Synthese. Bei ihr wird bei 600 K und 10 MPa Kohlenmonoxid mit Wasserstoff umgesetzt. Im Ausgangs-Gasgemisch hat man für CO einen Partial-Druck von 1 MPa und für Wasserstoff von 2 MPa gemessen. Innerhalb des chemischen Gleichgewichts betrug der Partial-Druck für Kohlenmonoxid dann 0,2 MPa.

Ansatz lt. Lsg. Abi 2018 MV



richtig müsste sein:

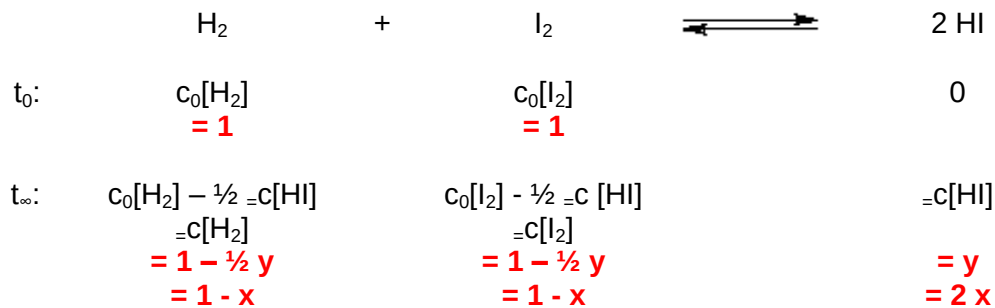


prüfen!!! 10 MPa noch nicht berücksichtigt!

$$K_p = \frac{p[\text{CH}_3\text{OH}]}{p[\text{CO}] \cdot p[\text{H}_2]}$$

$$K_p = \frac{0,8}{0,2 \cdot 1,2}$$

$$\underline{\underline{K_p = 3,3333 \text{ MPa}^{-1}}}$$



Tauchen Stoffe mehrere (stöchiometrisch) größere Stoffmengen in der Gleichung auf, dann muss man genau unterscheiden. Betrachtet man die Gesamt-Konzentration bzw. den Partial-Druck für den gesamten Stoff (im obigen Ansatz: **y**) oder meint man nur die einfache Stoffmenge (im obigen Ansatz: **x**). Dabei muss man beachten, dass die einfache Stoffmenge im Gleichgewicht selbst keine Bedeutung hat. Hier wirkt der Stoff immer als Ganzes.

### 5.3.2.2. Abhängigkeit und Beeinflussung des chemischen Gleichgewichtes



Chemische Reaktionen sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Bei Betrachtungen des chemischen Gleichgewicht's sind es weniger die Faktoren, welche die Geschwindigkeit der chemischen Reaktionen bestimmen. Vielmehr interessieren die Faktoren, mit denen man die Lage des Gleichgewichts verändern kann. Es geht dabei meist um die Erhöhung der Ausbeute. Für das chemische Gleichgewicht sind es vor allem die Konzentrationen, die Temperatur. Kommt es im Verlauf der Reaktion zu Volumen-Veränderungen, dann hat auch der Druck einen Einfluß auf die Lage des Gleichgewichts.

#### Aufgaben:

1. ***Tragen Sie die Faktoren zusammen, mit denen die Reaktions-Geschwindigkeit beeinflusst werden können! Erläutern Sie immer kurz die Zusammenhänge und / oder Wirkmechanismen!***

#### 5.3.2.2.1. Konzentrations-Abhängigkeit



Das Massenwirkungs-Gesetz postuliert uns ja eindringlich die Abhängigkeit der Lage des chemischen Gleichgewichts von den Konzentrationen der Reaktions-Produkte und Ausgangsstoffe.

Bei umkehrbaren Reaktionen mit Farb-Veränderungen lassen sich Veränderungen der Konzentrations-Verhältnisse meist gut beobachten.

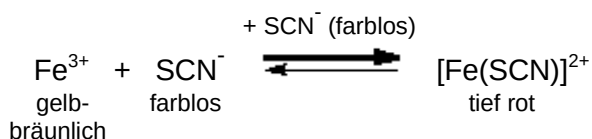


Das Reaktions-Produkt – Eisen(III)-thiocyanat – ist eine Komplex-Verbindung.

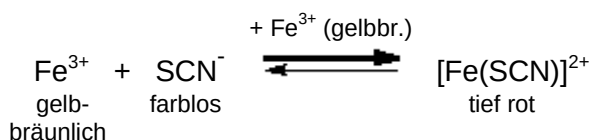
Setzt man nun zusätzlich von den farblosen Thiocyanid-Ionen hinzu, dann würde man auf den ersten Blick einen Verdünnungs-Effekt erwarten. Die rötliche Farbe sollte geringer werden.

---

Es passiert aber etwas Anderes: Die rötliche Farbe verstärkt sich. Dies bedeutet, dass der Anteil des Eisenthiocyanat-Komplexes gestiegen sein muss. Das Gleichgewicht wurde durch die Erhöhung der Thiocyanat-Ionen in Richtung Reaktions-Produkt verschoben.



Im Gegen-Test setzen wir nun zur Ursprungslösung Eisen(III)-Ionen zu. Auch hierbei beobachten wir den gleichen Effekt:



### Aufgaben:

1. Erstellen Sie im Vorfeld des folgenden Versuches ein ausführliches Protokoll (Aufgabe, Vorbetrachtung, Durchführung)! Lassen Sie sich das Protokoll vom Kurs-Leiter abzeichnen!
2. Führen Sie die folgende Experiment-Serie durch und protokollieren Sie Ihre Beobachtungen ausführlich!
3. Vervollständigen Sie Ihr Protokoll (Auswertung, Fehlerbetrachtung)!

---

## Verhalten eines Gleichgewichts unter veränderten Bedingungen

### **Materialien / Geräte:**

mind. 9 Reagenzgläser (RG), Reagenzglas-Ständer für mind. 9 RG, verd. Eisen(III)-chlorid-Lösung (0,02 mol/l), verd. Kaliumthiocyanat-Lösung (0,02 mol/l), Pipetten, Becherglas (50 ml), Mess-Zylinder (50 ml), verd. Salzsäure (HCl, 0,1M), Ascorbinsäure (fest), verd. Natronlauge (NaOH, 0,1M), demineralisiertes Wasser, Wasserbad 50 – 60 °C, Wasserbad 0 °C (Becherglas mit kaltem Wasser und einigen Eis-Würfeln)

### **Hinweise:**

Eisenchlorid und Natronlauge sind ätzend. Es wird mit einer Schutzbrille gearbeitet.

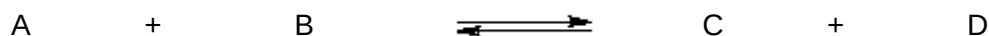
### **Vorbereitung:**

die Eisen(III)-chlorid-Lösung wird frisch angesetzt.

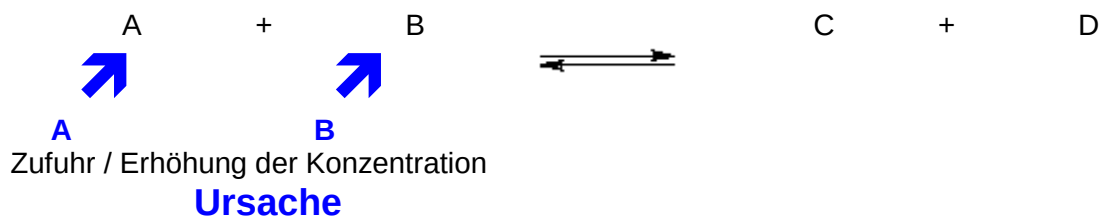
### **Durchführung / Ablauf:**

- 25 ml der Eisenchlorid-Lösung und 25 ml des Kaliumthiocyanat werden im Becherglas gemischt, dies ist die Stamm-Lösung für die weiteren Versuche
- von der Stamm-Lösung werden nun immer ungefähr 3 ml in 9 RG's gefüllt und auf definierte Plätze des RG-Ständers verteilt; die Lösung im letzten RG bleibt zu Vergleichs-Zwecken unverändert
- die restlichen RG's werden wie folgt mit Zusätzen versehen oder veränderten Bedingungen ausgesetzt:
  1. Zusatz von 1 ml Wasser (demineralisiert)
  2. Zusatz von 1 ml Eisenchlorid-Lösung
  3. Zusatz von 1 ml Kaliumthiocyanat-Lösung
  4. Zusatz von 1 ml verdünnte Natriumhydroxid-Lösung (Natronlauge)
  5. Zusatz von 1 ml verdünnte Chlorwasserstoffsäure (Salzsäure)
  6. Zusatz von einigen Kristallen Ascorbinsäure (1 Spatelspitze, Vitamin-C)
  7. Überführen des RG in ein Wärmebad (optimal 50 °C)
  8. Überführen des RG in ein Kältebad (optimal 0 °C)

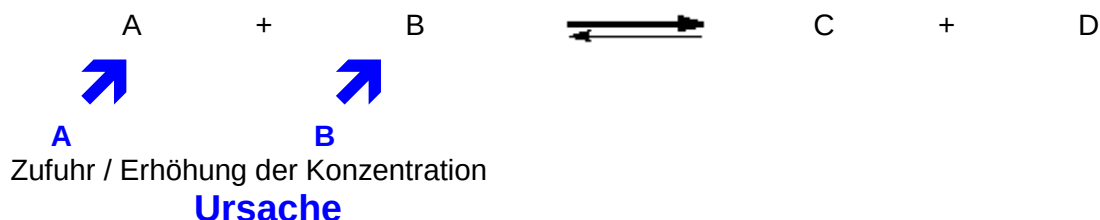
Für allgemeine Aussagen und Regeln betrachten wir die Modell-Reaktion:



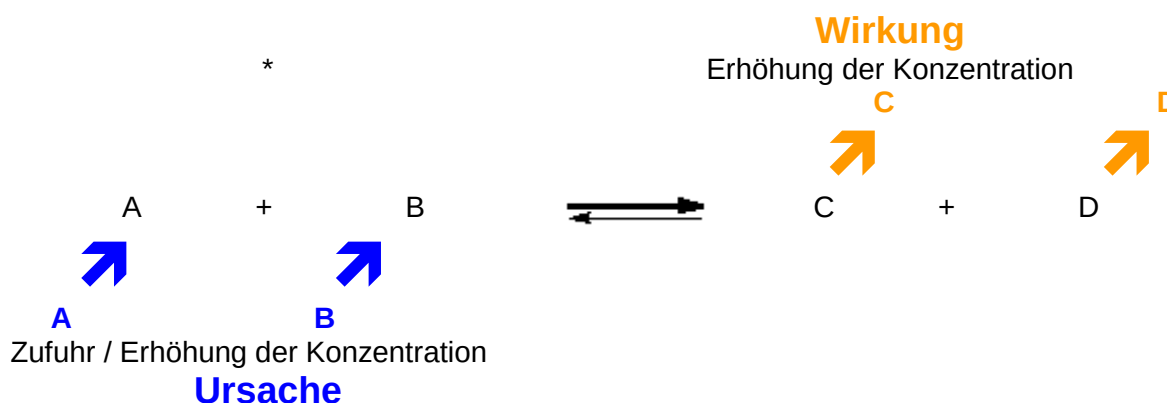
Um die einzelnen Wirk-Mechanismen und die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge besser zu veranschaulichen benutzen wir hier im Skript die folgende Kennzeichnung. Die Ursachen werden blau markiert. Mit Tendenz-Pfeilen soll die Veränderungs-Richtung sichtbar gemacht werden. Pfeile nach oben kennzeichnen eine Erhöhung / Vergrößerung.



Hier wurden also sowohl die Konzentration von A und B erhöht. Damit kommt es zu einer Beeinflussung der Anteile von Hin- und Rück-Reaktionen. Mit anderen Worten die Lage des chemischen Gleichgewichts ändert sich. Dies machen wir durch unterschiedliche Stärken der Reaktions-Pfeile deutlich. Dabei muss aber beachtet werden, dass hier nur die Veränderung veranschaulicht wird. Eine Reaktion bei der normal die Rück-Reaktion bevorteilt ist, kann trotz verstärkter Hin-Reaktion immer noch die stärkere Reaktion sein.

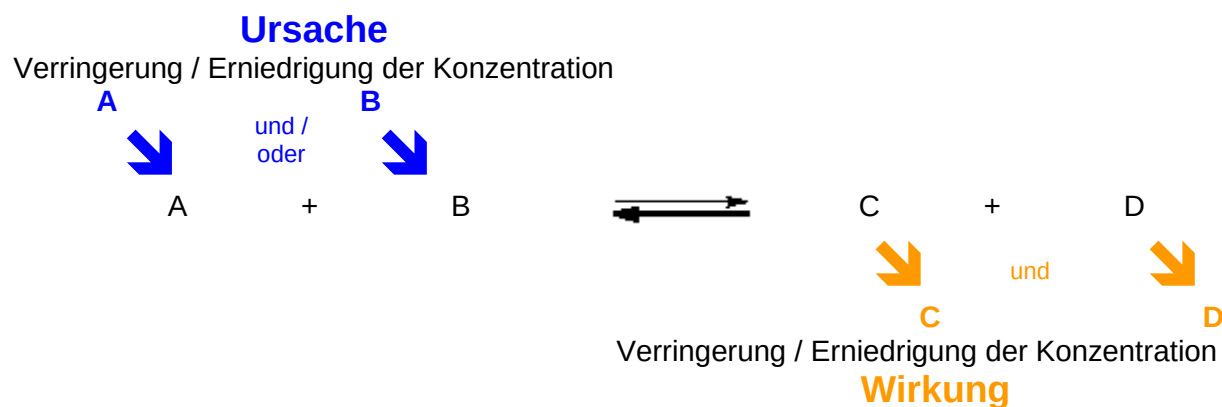


Interessant sind dann die Wirkungen. Für sie benutzen wir orangene Pfeile.



Im Beispiel steigen also durch die verstärkte Hin-Reaktion die Konzentrationen von C und D. Eine vollständige Übersicht nennen wir **Ursache-Wirkungs-Schema**.

Wichtig ist es, immer zu beachten, dass sich die Reaktionen vor der Beeinflussung in ihrem Gleichgewicht befunden haben. Wo das genau liegt ist nicht so entscheidend. Es geht uns letztendlich nur um die Veränderungen durch die Beeinflussung.



Ob die Faktoren oder Wirkungen oberhalb oder unterhalb notiert werden, hat eher ästhetische Gründe. Das obliegt dem Analysator. Wichtig ist ausschließlich die Richtung der Pfeile. Wie man an diesem einfachen Beispiel schon sieht, scheint es so als würde das Gleichgewicht der Beeinflussung ausweichen. Am Ende kann man dann eine oder mehrere Regel formulieren:

Eine Erhöhung der Konzentrationen der Ausgangs-Stoffe bewirkt eine Vergrößerung der Konzentrationen der Reaktions-Produkte (bei gleichzeitiger Verringerung der Konzentration der Ausgangs-Stoffe).

und / oder:

Die Erhöhung der Konzentrationen der Ausgangs-Stoffe bewirkt eine Verstärkung der Hinreaktion (bis das Gleichgewicht zwischen Hin- und Rück-Reaktion wieder hergestellt ist).

### Aufgaben:

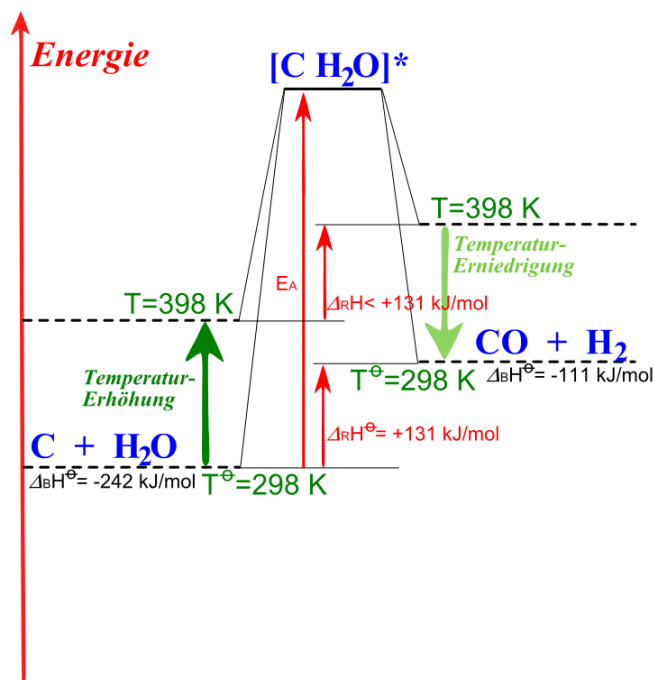
1. Formulieren Sie die Regeln für die Verringerung der Konzentrationen!
2. Geben Sie die Regeln für die Beeinflussung immer nur einer Konzentration (in einer Reaktion mit mind. 2. Ordnung) an! Beachten Sie alle Stoffe!

### 5.3.2.2.2. Temperatur-Abhängigkeit



Bei der Bewertung des Einflusses einer Temperatur-Veränderung auf ein chemisches Gleichgewicht müssen wir immer zwei Effekte beachten. Diese können sich verstärken aber auch gegenseitig ausgleichen.

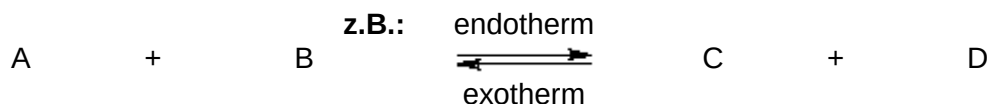
Der erste Effekt ist die allgemeine Beschleunigung einer Reaktion mit der Erhöhung der Temperatur. Diesen Effekt kennen wir schon unter der Bezeichnung "RGT-Regel". Erhöht man die Temperatur um 10 K, dann erhöht sich die Reaktions-Geschwindigkeit durchschnittlich um das Zwei- bis Drei-fache. Zu beachten ist aber, dass dieser Effekt sowohl für die Hin- als auch für die Rück-Reaktion gilt. Beide werden bei einer Temperatur-Erhöhung also schneller und bei einer Erniedrigung langsamer. Die Energie-Niveaus der Ausgangs-Stoffe und der Reaktions-Produkte sind jeweils angehoben bzw. gesenkt. Im nebenstehenden Energie-Niveau-Schema ist dies für eine Temperatur-Erhöhung um 100 K angedeutet.



Für Hin- und Rück-Reaktion sind die zu überwindenden Berge (Aktivierungs-Energien) deutlich kleiner geworden. Die Dynamik im Gleichgewicht wird somit wesentlich größer. Die Lage des Gleichgewichts aber bleibt gleich.

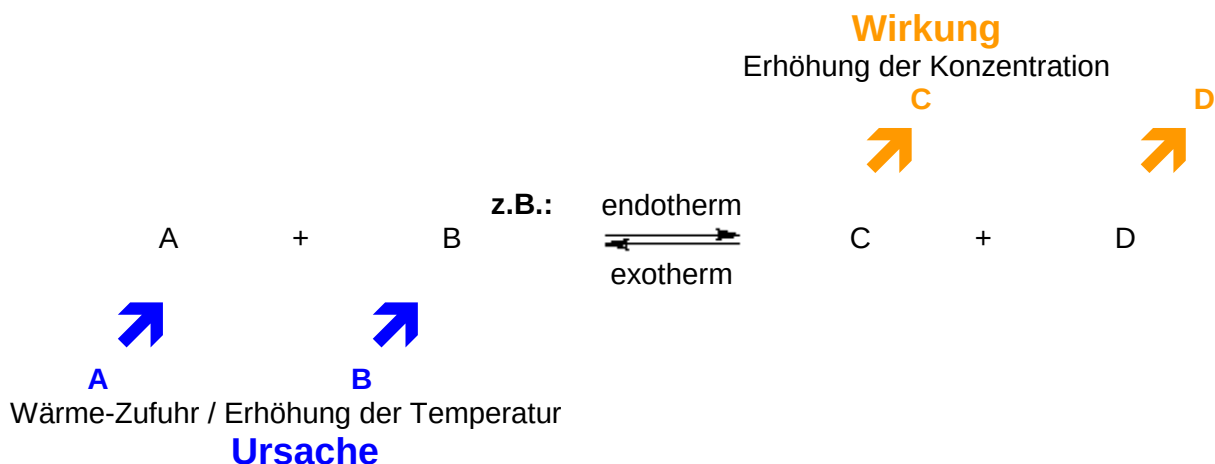
Die Anwendung der RGT-Regel ist vor allem dann interessant, wenn man eine größere oder kleinere Dynamik wünscht. Werden z.B. ständig Reaktions-Produkte aus dem Gleichgewicht entfernt, dann kann eine schnelle(re) Nachbildung im Sinne der Synthese-Planer sein.

Der zweite Effekt betrifft die Wärme-Tönung der Reaktion. Ist in einem chemischen Gleichgewicht z.B. die Hin-Reaktion endotherm, dann muss (- wegen dem Energie-Erhaltungs-Satz -) die Rück-Reaktion exotherm sein.

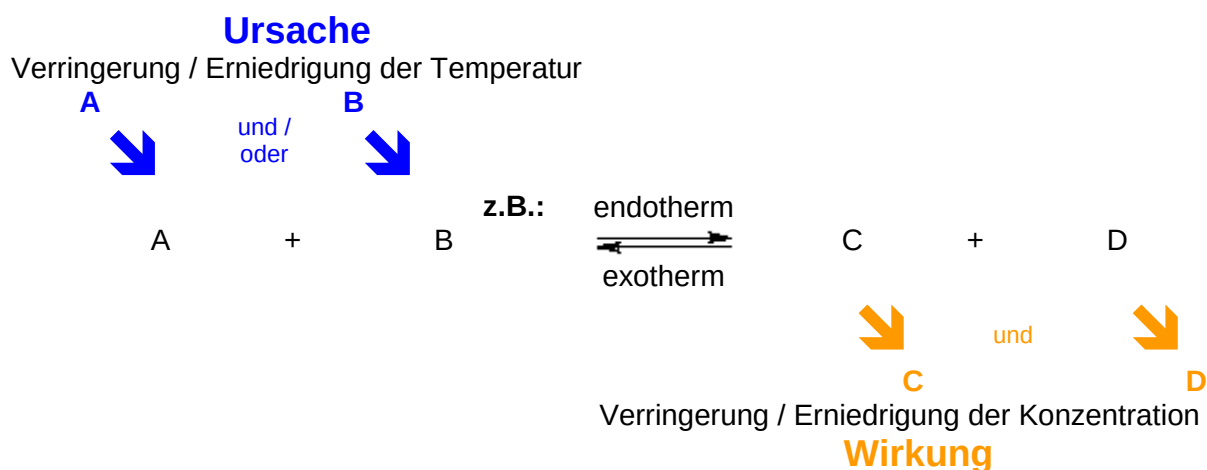




Für eine endotherme Reaktion ist eine Temperatur-Erhöhung förderlich.



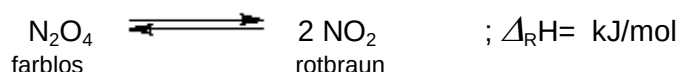
Die exotherme Rück-Reaktion wird durch eine Temperatur-Erhöhung aber behindert. Die Reaktions-Partner wollen eigentlich Energie loswerden, eine Temperatur-Erhöhung wirkt diesem aber entgegen.



### Aufgaben:

**1. Entwickeln Sie die Ursache-Wirkungs-Schemata für ein chemisches Gleichgewicht, bei dem die Hin-Reaktion exotherm ist!**

### Thermische Dissoziation / Zerlegung von Distickstofftetr(a)oxid



| T [°C]               | 0      | 8,7    | 25    | 35    | 45    | 50    | 86,5  | 101,5 | 130,8 |
|----------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K <sub>d</sub> [atm] | 0,0177 | 0,0374 | 0,147 | 0,302 | 0,628 | 0,863 | 7,499 | 16,18 | 59,43 |

Q: de.wikipedia.org [Dissoziationskonstante]

Die Dissoziations-Konstante (abgeleitet aus dem MWG (→ [5.3.2.1. das Massenwirkungs-Gesetz](#)))

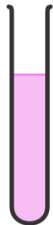
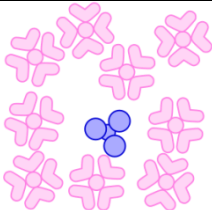
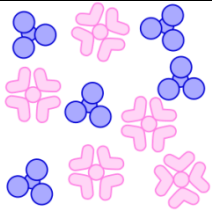
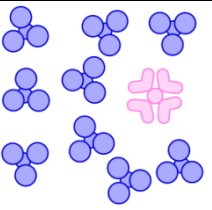
$$K_d = \frac{p^2[\text{NO}_2]}{p[\text{N}_2\text{O}_4]}$$

gibt an, auf welcher Seite sich das Dissoziations-Gleichgewicht einstellt. Je größer  $K_d$ , umso mehr liegt das Gleichgewicht auf der Seite der dissoziierten Teilchen (also der Reaktions-Produkte). Ein kleiner  $K_d$  zeigt eine geringe Dissoziation an. Das Gleichgewicht liegt auf der Seite der Ausgangsstoffe (Edukte) – also der nicht-dissoziierten Teilchen.

Beim Auspacken von elektronischen Geräten stolpert man eigentlich immer über kleine Tütchen mit einem körnigen Inhalt. Dabei handelt es sich um Trocknungs-Mittel (z.B. poröse Kieselsäure), die dafür sorgen sollen, dass sich kein Kondenswasser in den Packungen bildet.

Meist ist Silica-Gel (auch "Blaugel" genannt) in den Tütchen enthalten. Dabei wird Cobalt(II)-chlorid als Farb-Indikator benutzt. Wenn das Silica-Gel mit Wasser gesättigt ist, nimmt das Trocknungs-Mittel eine blaue Farbe an. Trockenenes Silica-Gel ist blass-rosa, was meist eher farblos erscheint.

Gibt man Cobalt(II)-chlorid in verdünnte Salzsäure, dann kommt es zu einer unter Standard-Bedingungen leicht endothermen Reaktion unter Bildung von tetraedrischen Cobaltchlorid-Ionen.

| gekühlt<br>278 K / 5 °C                                                                                                 | Zimmer-Temperatur<br>298 K / 25 °C                                                                                  | erwärmt<br>338 K / 45 °C                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                      | $\text{CoCl}_2$<br>$\text{HCl}$  |  |
| $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+} + 4 \text{Cl}^- \rightleftharpoons [\text{CoCl}_4]^{2-} + 6 \text{H}_2\text{O}$ |                                                                                                                     |                                                                                       |
|                                      |                                  |  |

Kühlt man das Gemisch, dann stellt sich eine blass-rosa Farbe ein. Die Cobalt-Ionen werden von sechs Wasser-Molekülen umlagert und bilden einen Aqua-Komplex. Mit steigender Temperatur zerfallen diese Komplexe und es bilden sich immer mehr Cobalt-Chlorid-Komplexe. Sie sind blau gefärbt und überlagern das Blass-Rosa sehr schnell.

### Aufgaben für die gehobene Anspruchsebene:

1. Übernehmen Sie die obigen Teilchen-Darstellungen! Skizzieren Sie die angegebenen Teilchen in den gleichen Farben und etwas weiter auseinander gezogen!
2. Erweitern Sie Sie nun die Skizzen um die jeweils fehlenden (farblosen) Teilchen! Zeichnen Sie diese mit Bleistift ein!

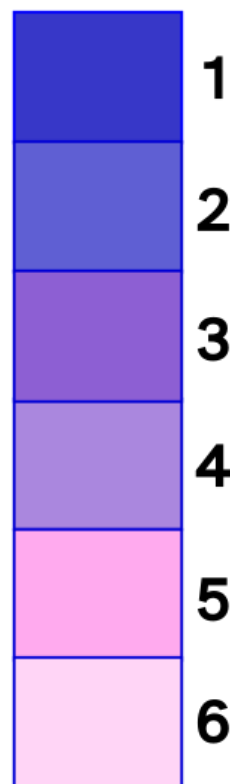
## Temperatur-Abhängigkeit der Reaktion von Cobalt(II)-chlorid in Salzsäure

### Materialien / Geräte:

Cobalt(II)-chlorid; verd. Salzsäure; Reagenzglas; Eis-Würfel; Heizplatte od. heißes Wasser; Becherglas

### Durchführung / Ablauf:

- Cobalt(II)-chlorid in verdünnter Salzsäure lösen
- Temperatur messen
- Farbe über die Skala identifizieren (ev. Probe für Farbvergleich in einem extra Reagenzglas zurückhalten)
- Reaktions-Gemisch in einem Becherglas mit Eis-Wasser abkühlen lassen
- Temperatur messen
- Farbe über die Skala identifizieren
- Reaktions-Gemisch erwärmen (z.B. in einem Becherglas mit heißem Wasser)
- Temperatur messen
- Farbe über die Skala identifizieren (ev. Probe für Farbvergleich in einem extra Reagenzglas zurückhalten)



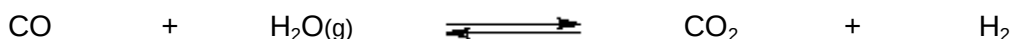
### 5.3.2.2.3. Druck-Abhängigkeit



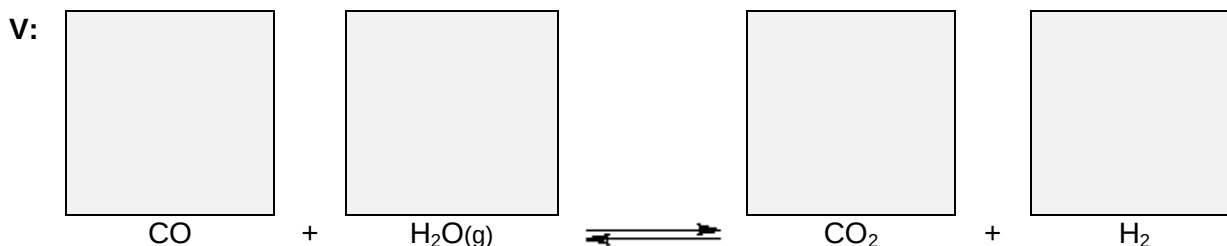
Damit eine Druck-Veränderung überhaupt eine Wirkung in einem chemischen System hat, muss dieses eine Volumen-Veränderung durchmachen. Praktisch haben wir das nur bei Reaktionen mit Gasen. Weiterhin müssen sich die Volumen von Ausgangs-Stoffen und Reaktions-Produkten unterscheiden.

Natürlich wirkt der Druck auch auf feste oder flüssige Stoffe. Nur ist hier die Wirkung – wegen der sehr geringen Kompressibilität – extrem (vernachlässigbar) gering. Wir können im Normal-Fall die Druck-Abhängigkeit solcher Reaktionen ignorieren.

Die Reaktion:

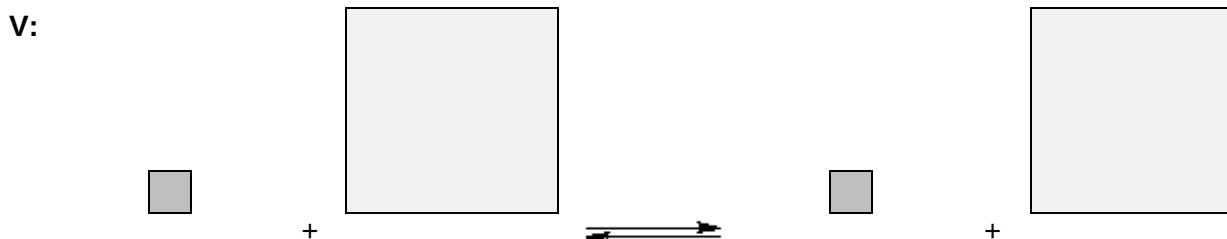


kann durch Druck-Veränderungen nicht beeinflusst werden, da auf beiden Seiten der Gleichung gleich große Volumina stehen:



Bei Reaktionen mit unveränderlichen Volumen kommt es z.B. durch eine Druck-Erhöhung zu einer Konzentrations-Erhöhung im Gefäß. Das Volumen wird ja kleiner und die Stoffmenge bleibt gleich. Praktisch verändern sich die Geschwindigkeiten für die Hin- und Rück-Reaktion, was wiederum nur die Dynamik des Gleichgewichtes beeinflusst, aber nicht seine Lage.

Ähnlich verhält es sich bei Gleichgewichten, in den Flüssigkeiten und / oder Feststoffe reagieren. Wir brauchen hier nur die Gas-Volumen betrachten, da die anderen Stoffe praktisch nicht kompressibel sind.

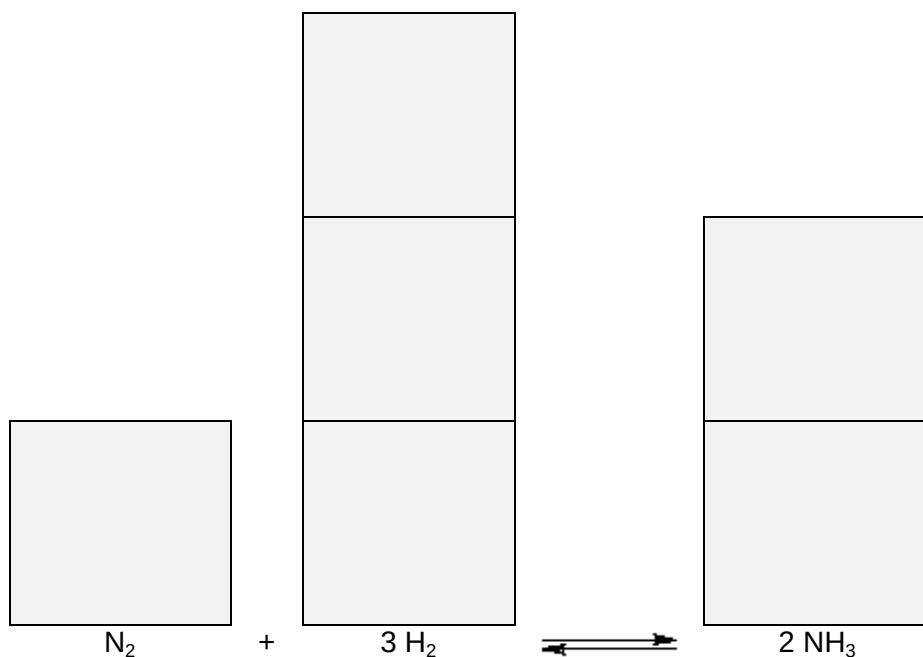


Beachten Sie bitte, dass die Andeutung der Größen-Verhältnisse bei den verschiedenen Aggregat-Zuständen nur schematisch ist. In der Praxis haben Gase ein rund 200x größeres Volumen pro Mol als Flüssigkeiten und Feststoffe. Der Unterschied zwischen Feststoffen und Flüssigkeiten ist minimal und minimal!

---

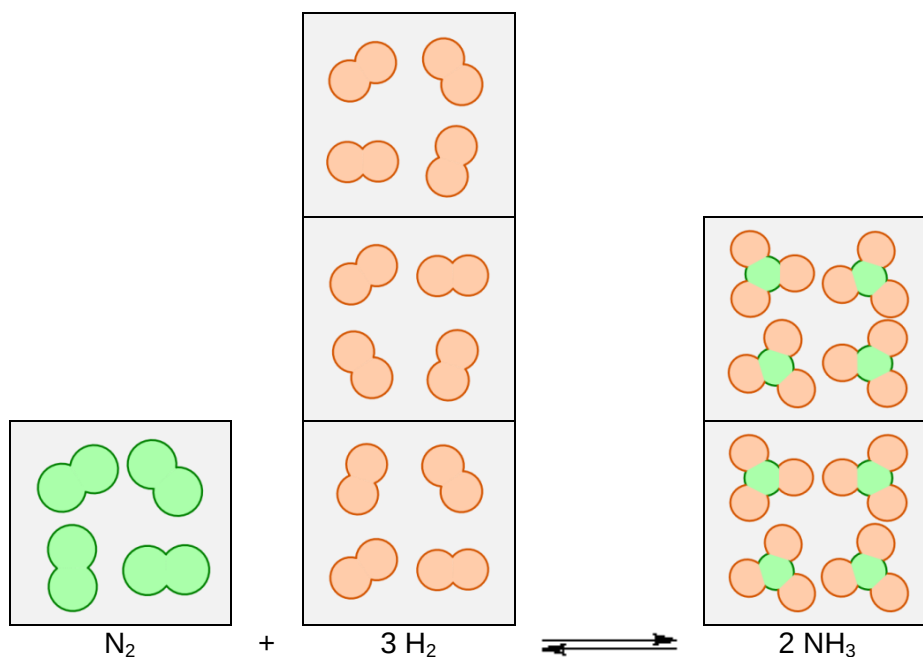
Ein schönes Beispiel für die Beeinflussbarkeit des Gleichgewichtes durch den Druck ist die Ammoniak-Synthese:

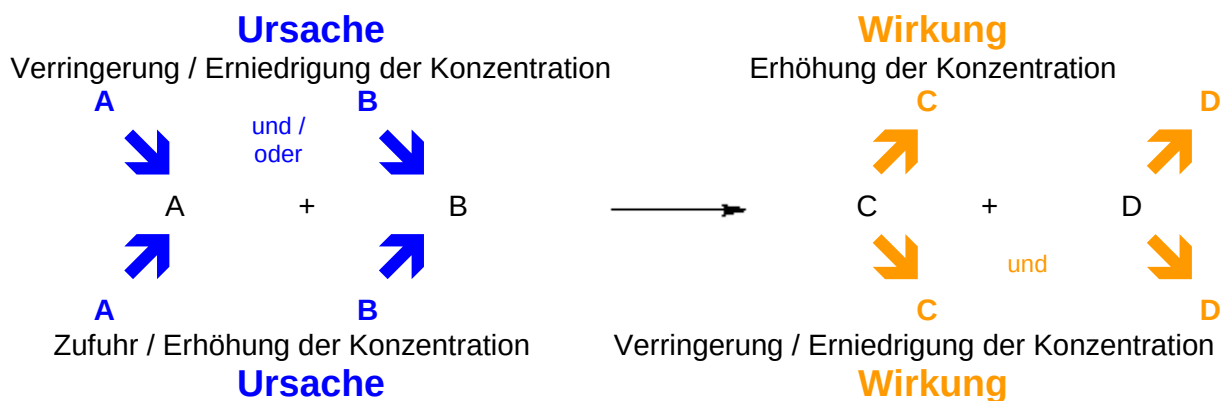
V:



Die Ausgangs-Stoffe benötigen / beanspruchen das doppelte Volumen, wie die Reaktions-Produkte. Erhöht man nun z.B. den Druck so, dass die Ausgangs-Stoffe mit der Hälfte des Volumens auskommen müssten, dann kann man sich gut vorstellen, dass die Teilchen (im Gleichgewicht) lieber in dem Zustand sind, der genau diesen zwei Volumen-Einheiten entspricht. Und das ist das Reaktions-Produkt Ammoniak. Es ist einfach energetisch günstiger in der "Ammoniak"-komprimierten Form zu existieren, als in der expandierten Form der Ausgangs-Stoffe, wo eine extreme Drängelei besteht.

V:





### Beispiele

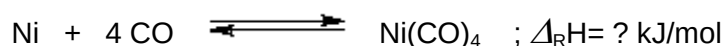
Bildung von Phosgen aus Kohlenmonoxid und Chlor



Umwandlung von Blei(II,III)-oxid in Blei(II)-oxid



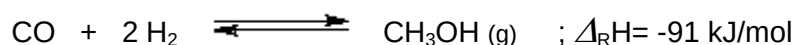
Reaktion von Nickel mit Kohlenmonoxid



Reaktion von Schwefelwasserstoff mit Methan zu Kohlenstoffsulfid (gasförmig)



Methanol-Synthese aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff



Synthese von Ethanol aus

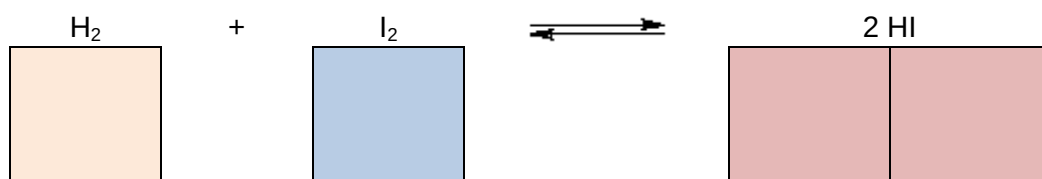


---

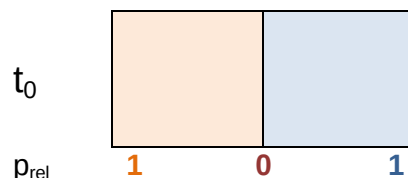
**Aufgaben:**

- 1. Warum ist das Öffnen einer Mineralwasser-Flasche (mit Kohlensäure) eine Beeinflussung des chemischen Gleichgewichts durch Druck? Erläutern Sie ausführlich!***
- 2. Ein Geizhals behauptet, dass er dadurch, dass er Kohlensäure-haltiges Mineral-Wasser aus angebrochenen Flaschen zusammenkippt, er länger Wasser mit einem höheren Kohlensäure-Anteil erhalte (Sein Wasser soll so länger sprudeln, als wenn man es in den angebrochen Flaschen belässt.). Setzen Sie sich mit der Sparfuchs-Idee auseinander! Belegen oder widerlegen Sie die Sparfuchs-Idee! (Alle Flaschen werden immer geschlossen und bei gleicher Temperatur gelagert!)***
- 3. Planen Sie ein Experiment oder eine Experiment-Serie, in dem die Sparfuchs-Idee aus Aufgabe 2 geprüft werden kann!***

## Verfolgung chemischer Gleichgewichte über den Druck



Die Reaktion würde praktisch ohne Volumen- oder Druck-Veränderungen ablaufen. Könnte man zu den einzelnen Reaktions-Zeitpunkten die Volumen selektieren, dann ergäbe sich in etwa das folgende Bild. Dabei gehen wir auch davon aus, dass bei der Reaktion nur die Bildung stattfindet.



Eine eventuelle Rück-Reaktion soll es nicht geben. (Dazu später mehr  $\rightarrow$ .)

Die Mengen-Verhältnisse lassen sich sowohl über die Stoffmenge als auch über die Partial-Drücke betrachten. Gehen wir von anfänglich je einer Druck-Einheit beider Ausgangsstoffe aus. Vom Reaktions-Produkt gibt es noch nichts. Das bedeutet dessen Partial-Druck beträgt 0 Einheiten.

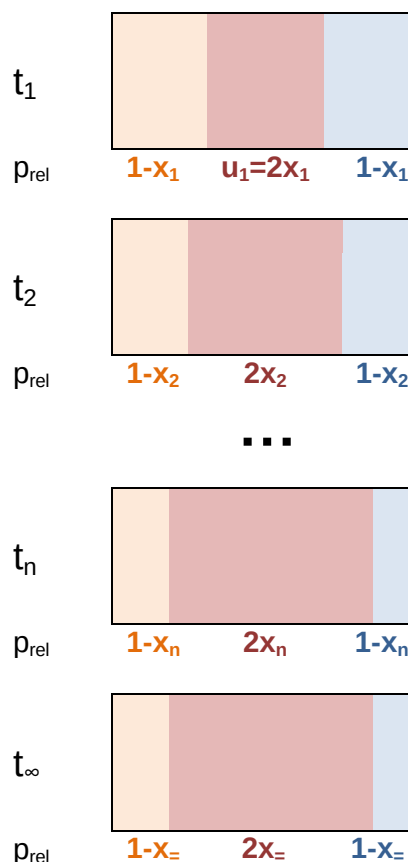
Nach einer bestimmten Zeit hat schon ein Teil der beiden Ausgangsstoffe miteinander reagiert. Genau diese Anteile werden jetzt durch die gebildeten Reaktions-Produkte ausgefüllt.

Die Partial-Drücke der Ausgangsstoffe haben sich verringert, da sie sich gemeinsam umgewandelt haben. Diese neu gebildete Menge wird durch  $u$  beschrieben. Je eine Hälfte stammt von je einem der Ausgangsstoffe. Aus rechen-praktischen Gründen umschreiben wir  $u$  gleich durch  $2x$ . Soe können wir ein  $x$  jeweils bei einem der Ausgangsstoffe abziehen..

Wieder etwas später ist der Anteil der Reaktions-Produkte weiter gestiegen. Dafür nimmt proportional der Anteil der Ausgangsstoffe ab.

Je größer nun der Anteil an Reaktions-Produkten wird, umso öfter wird auch die Rück-Reaktion stattfinden. Irgendwann werden Hin- und Rückreaktion mit dem gleich Umsatz stattfinden. Jetzt ist das chemische Gleichgewicht eingestellt. Außer zufälligen Schwankungen bleiben die Partial-Drücke bzw. die Stoffmengen konstant. Theoretisch wird es niemals zum vollständigen Umsatz kommen.

Mit der Einstellung des Gleichgewichtes haben wir unveränderlich Partial-Drücke aller Stoffe.

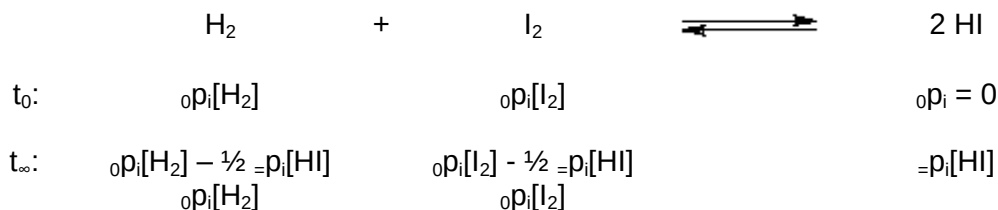
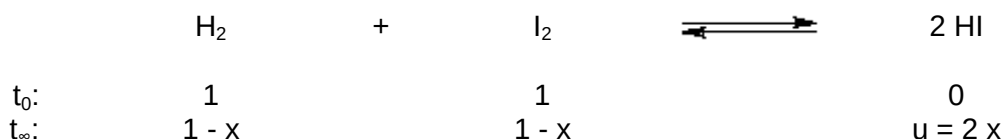




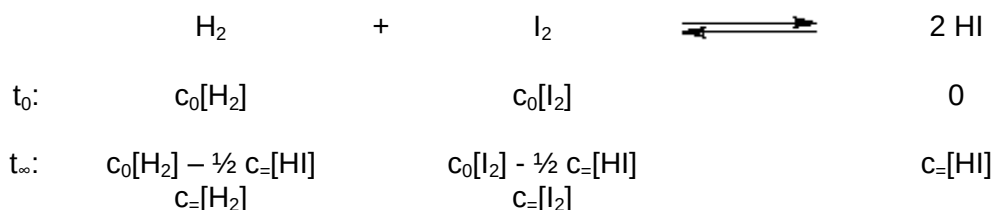
Für ein imaginäres Teilchen-Modell mit jeweils 1000 Teilchen jedes Ausgangsstoffs ergäben sich bei einem Umsatzfaktor von 0,2 für die Hinreaktion und 0,1 für die Rückreaktion die folgenden Teilchen-Zahlen:

| Zeit           | 0     | 1     | 2     | 3    | 4     | 5     | 6     | 8     | 12    | 20    | $\infty$ |
|----------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| H <sub>2</sub> | 1'000 | 820   | 676   | 561  | 469   | 395   | 336   | 251   | 162   | 110   | 100      |
| I <sub>2</sub> | 1'000 | 820   | 676   | 561  | 469   | 395   | 336   | 251   | 162   | 110   | 100      |
| AS             | 2'000 | 1'640 | 1'352 | 1122 | 938   | 790   | 672   | 502   | 324   | 220   | 200      |
| HI             | 0     | 400   | 720   | 976  | 1'180 | 1'344 | 1'476 | 1'498 | 1'676 | 1'780 | 1'800    |
| RP             | 0     | 400   | 720   | 976  | 1'180 | 1'344 | 1'476 | 1'498 | 1'676 | 1'780 | 1'800    |

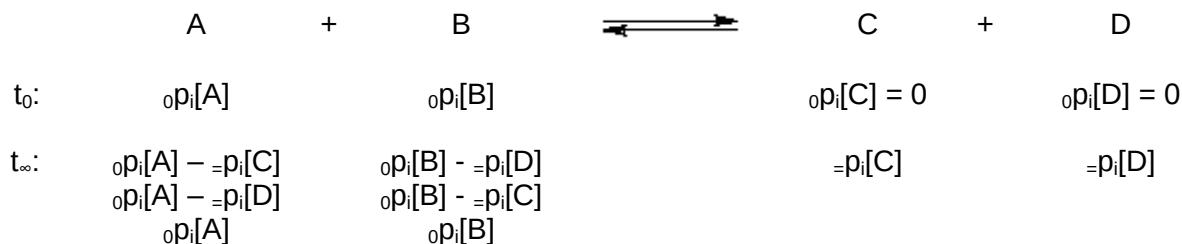
Die Erkenntnisse aus den Modellen nutzen wir nun für Berechnungen im chemischen Gleichgewicht. Das können die Ermittlungen von Partialdrücken, Stoffmengen aber auch von Reaktions-Konstanten sein.

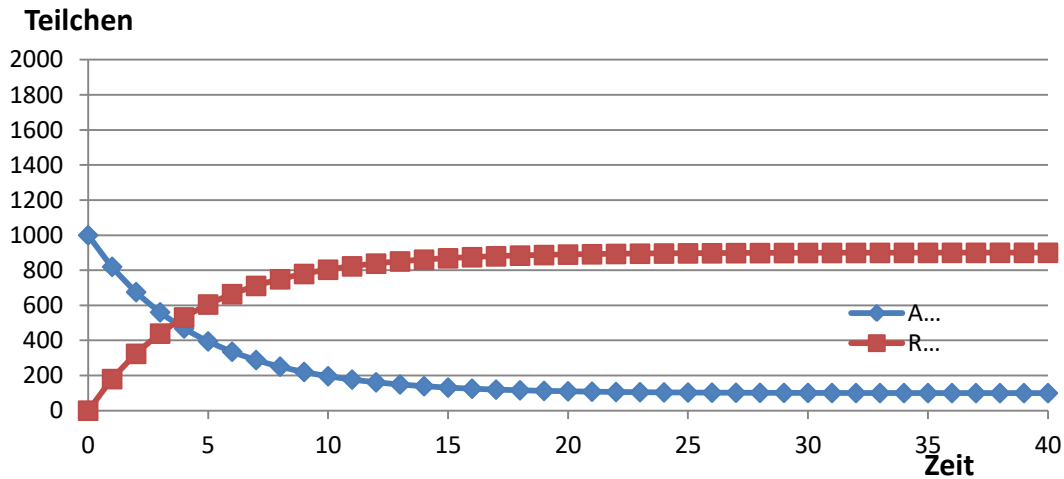


also völlig äquivalent zum Konzentrations-Ansatz:

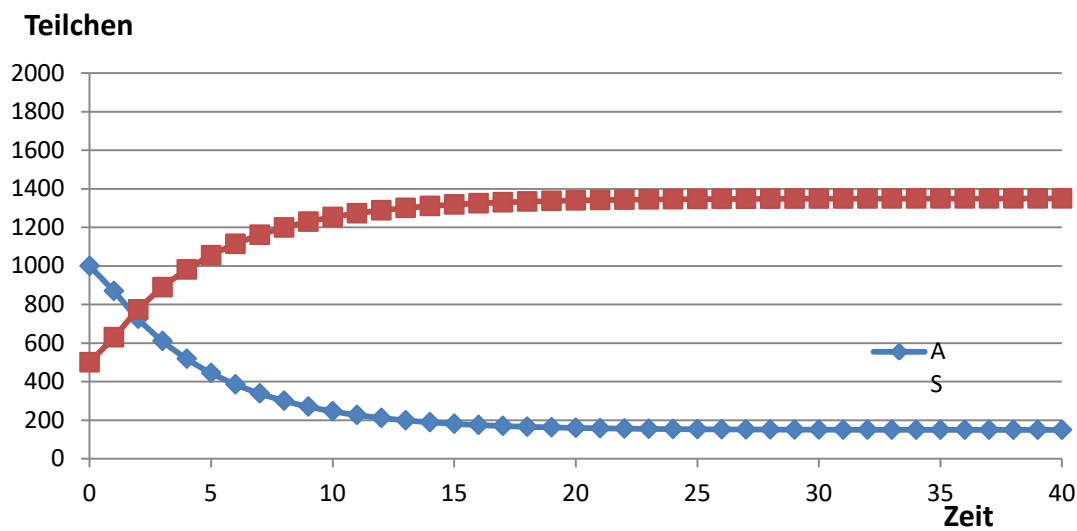


für allgemeine Gleichung:

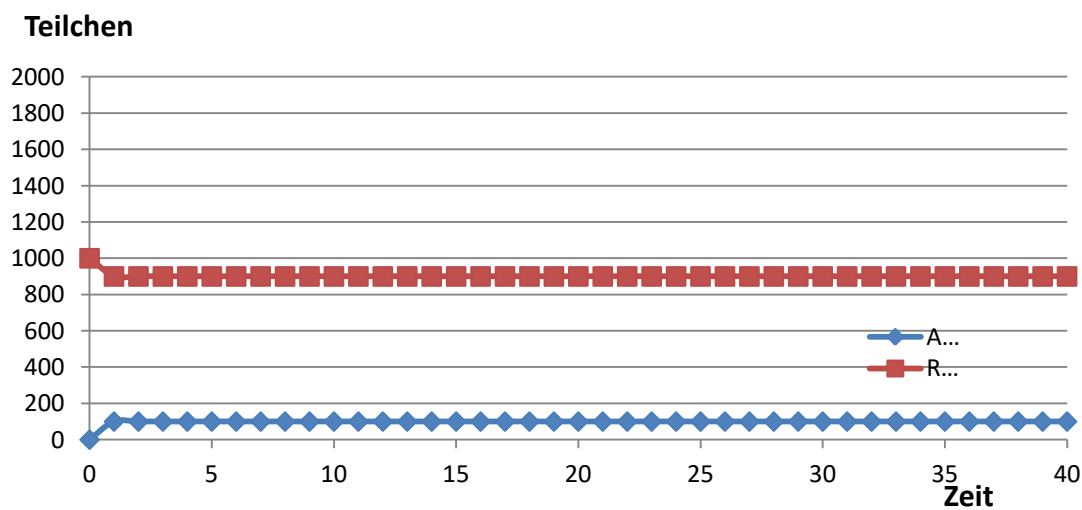




im Ausgangs-Ansatz ist schon Reaktions-Produkt enthalten

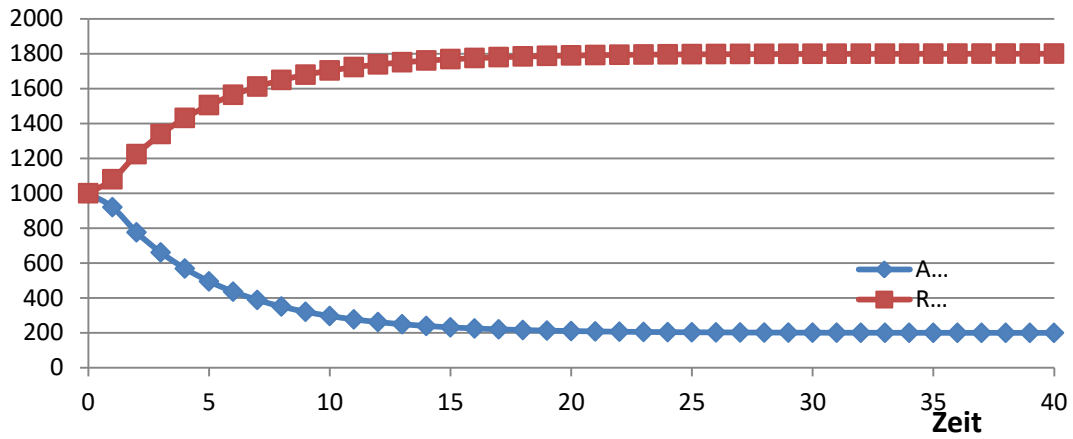


es beginnt nur mit Reaktions-Produkten



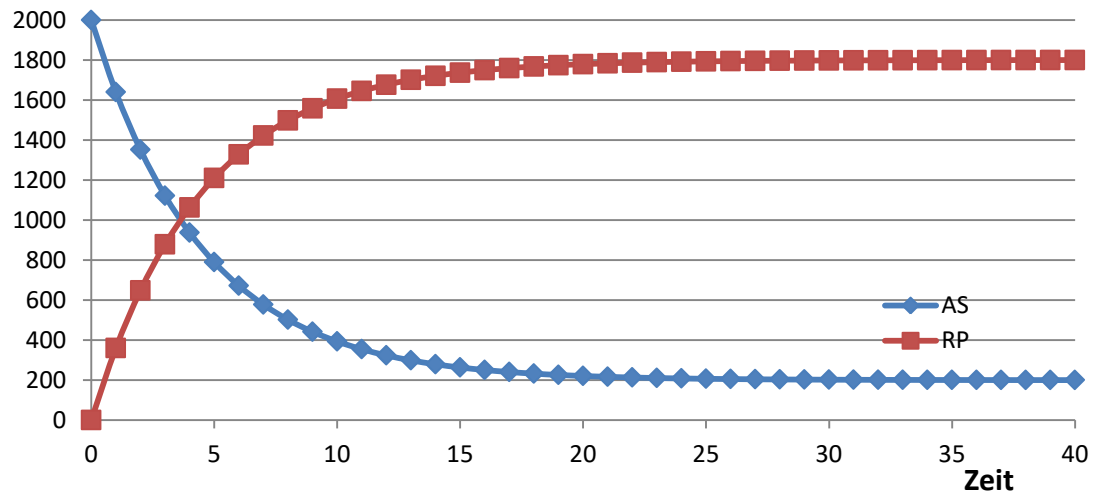
Start mit gleichviel Ausgangs-Stoff und Reaktions-Produkt

### Teilchen



zurück zu Ausgangs-Situation – jetzt mit auch mit insgesamt 2000 Teilchen Ausgangs-Stoff

### Teilchen



## Prinzip von LE CHATELIER / BRAUN



Chemische Gleichgewichte sind durch bestimmte Gleichgewichts-Bedingungen gekennzeichnet. Dazu gehören eine bestimmte Temperatur, ein bestimmter Druck und bestimmte Konzentrationen.

Die Lage des Gleichgewichts ist von vielen Faktoren abhängig. Hierbei wird vor allem die Dynamik chemischer Gleichgewichte deutlich. Auch wenn es so scheint, als würde im Gleichgewicht nichts mehr passieren, sind intern die verschiedenen Teil-Reaktionen weiter aktiv. Ihre Wirkungen heben sich nur gegeneinander auf.

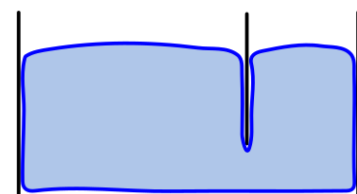
Beim Einwirken äußerer Faktoren wirken diese aber unterschiedlich auf die Teil-Reaktionen. Das Gleichgewicht verändert sich. Dabei erscheint es von außen betrachtet so, als würde das Gleichgewicht der äußeren Beeinflussung ausweichen.

Nehmen wir zu Verdeutlichung noch einmal einige Beispiele. Erhöhen wir in einem Gleichgewicht die Konzentration eines oder mehrerer Ausgangs-Stoffe (Ursache), dann bilden sich als Wirkung mehr Reaktions-Produkte. Das Gleichgewicht verlagert sich auf die Seite der Reaktions-Produkte – weg von den Ausgangs-Stoffen, deren Erhöhung ja die Ursache war.

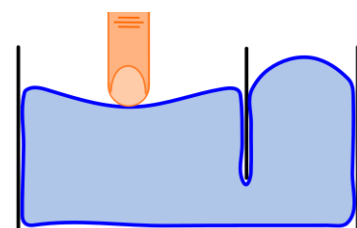
Oder nehmen wir eine exotherme Hin-Reaktion. Erhöhen wir die Temperatur, dann wird die endotherme Rück-Reaktion gefördert.

(Den RGT-Effekt ignorieren wir hier, da er sowohl auf die Hin- als auch auf die Rück-Reaktion wirkt, wenn auch in leicht unterschiedlicher Stärke.) Das Gleichgewicht reagiert also durch eine Verschiebung der Lage in Richtung Ausgangsstoffe.

Diese Beispiele lassen sich fortsetzen.



unbeeinflusstes Gleichgewicht



beeinflusstes Gleichgewicht

Prinzip-Modell für das Prinzip  
VON LE CHATELIER / BRAUN

### Aufgaben:

**1. Zeigen Sie am Beispiel eines Druck-abhängigen Gleichgewichtes, wie sich die Lage bei einer äußeren Beeinflussung verhält!**

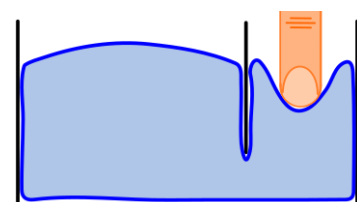
2.

3.

Henry LE CHÂTELIER (1884) und unabhängig von ihm auch Ferdinand BRAUN (1888) beschäftigten sich mit eben diesen Beeinflussungen von chemischen Gleichgewichten.

Sie formulierten als Ergebnis das Prinzip des kleinsten Zwanges, bei dem ein Gleichgewicht einem äußeren (stärkeren) Faktor ausweicht, um so wieder in eine neue Gleichgewichts-Lage zu geraten. Das System bewegt sich scheinbar hin zu einem kleineren / geringeren Zwang.

In Würdigung der Leistungen wird das Prinzip auch das Prinzip von LE CHATELIER genannt. Die gleichartige Leistung von BRAUN ist in der Geschichte leider ins Hintertreffen geraten. Man sollte also besser vom Prinzip von LE CHATELIER / BRAUN sprechen.



---

**Definition(en): Prinzip von LE CHÂTELIER / BRAUN****Definition(en): Prinzip des kleinsten Zwangs**

Das Prinzip von LE CHÂTELIER / BRAUN besagt, dass ein chemisches Gleichgewicht bei äußeren Einwirkungen (Temperatur, Konzentration, Druck) diesen so ausweicht, dass die Wirkungen minimiert werden.

**Modell-Reaktion:  $A \rightleftharpoons B$** 

| $K_C$      | $(\Delta G^0 [A] - \Delta G [B])$<br>[kcal / mol] | Bemerkungen |
|------------|---------------------------------------------------|-------------|
| $10^5$     | -7,1                                              |             |
| $10^4$     | -5,7                                              |             |
| $10^3$     | -4,3                                              |             |
| $10^2$     | -2,8                                              |             |
| $10^1$     | -1,4                                              |             |
| $10^0 = 1$ | 0                                                 |             |
| $10^{-1}$  | 1,4                                               |             |
| $10^{-2}$  | 2,8                                               |             |
| $10^{-3}$  | 4,3                                               |             |
| $10^{-4}$  | 5,7                                               |             |
| $10^{-5}$  | 7,1                                               |             |

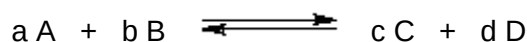
Q: ALBERTS et.al.: Essential Cell Biologie – 4. Edit.;  
Garland Science; S. 98

| Maßnahme                               | Ausgangs-Situation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Ziel / Wirkung / Ergebnis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Eignung der Maßnahme |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
|                                        | $A(s) + B(l) \rightleftharpoons C(g) + D(l) ; \Delta_R H = + kJ$                                                                                                                                                                                                                                                                        | $A + B \rightleftharpoons C + D$<br>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                      |
|                                        |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                      |
| <b>Erhöhung Ausgangsstoffe</b>         |  <br><br>Erhöhung beider Konzentrationen oder nur die eines Ausgangsstoffes          |  <br>Hin-Reaktion gefördert<br> <br>Verschiebung GG zu Reaktionsprod.                                                                                                                                                               | <b>geeignet</b>      |
| <b>Verringerung Ausgangsstoffe</b>     |  <br><br>Verringerung beider Konzentrationen oder nur die eines Ausgangsstoffes      |  <br>Rück-Reaktion gefördert<br> <br>Verschiebung GG zu Ausgangsst..                                                                                                                                                                | <b>ungeeignet</b>    |
| <b>Verringerung Reaktions-Produkte</b> | Verringerung einer oder beider Konzentrationen der Reaktionsprodukte<br> <br>        |  <br>                                                                                                                                                                                                                               | <b>geeignet</b>      |
| <b>Erhöhung Reaktions-Produkte</b>     | Verringerung einer oder beider Konzentrationen der Reaktionsprodukte<br> <br>        |  <br>                                                                                                                                                                                                                               | <b>ungeeignet</b>    |
| <b>Druck-Erhöhung</b>                  | Reaktion mit Volumen-Zunahme<br>V:                                                                                                                                                                                                                     |  <br> <br>                                                    | <b>ungeeignet</b>    |
| <b>Druck-Verringerung</b>              | Reaktion mit Volumen-Zunahme<br>V:                                                                                                                                                                                                                    |  <br> <br>                                          | <b>ungeeignet</b>    |
| <b>Temperatur-Erhöhung</b>             | endotherm (Rückreakt.: exotherm)<br>T:                                                                                                                                                                                                               |  <br> <br>= =<br>Hin- und Rückreaktion beschleunigt (nach RGT-Regel); Gleichgew. bleibt; = = stellt sich schneller ein                                                                                                      | <b>geeignet</b>      |
|                                        | endotherm (Rückreakt.: exotherm)<br>T:                                                                                                                                                                                                               |  <br> <br> <br>endotherme Reaktion bevorteilt     | <b>geeignet</b>      |
| <b>Temperatur-Verringerung</b>         | (endotherm) Rückreakt.: exotherm<br>T:                                                                                                                                                                                                               |  <br> <br> <br>exotherme Rück-Reaktion bevorteilt | <b>ungeeignet</b>    |
| <b>Katalysator</b>                     | künstlich gewählt<br>Kat.                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  <br> <br>= =<br>Hin- und Rückreaktion beschleunigt; Gleichgew. bleibt; = = stellt sich schneller ein                                                                                                                       | <b>geeignet</b>      |

## Beziehungen zwischen $K_c$ und $K_p$



klassische allgemeine Reaktions-Gleichung:



$$K_c = \frac{c[C]^c \cdot c[D]^d}{c[A]^a \cdot c[B]^b}$$

$$c = \frac{n}{V}$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$$

$$c = \frac{n \cdot V}{n \cdot V \cdot R \cdot T} = \frac{1}{R \cdot T}$$

$$p = c \cdot R \cdot T$$

$$K_p = K_c \cdot R \cdot T$$

## Beziehungen zwischen der Gleichgewichts-Kinetik und der Thermodynamik

Abhängigkeit der Freien Enthalpie (GIBBS-Energie; Reaktions-Antrieb) von Nicht-Standard-Bedingungen

$$\Delta_R G = \Delta_R G^o + R \cdot T \cdot \ln RQ$$

RQ ... Reaktions-Quotient

unter der Annahme, dass der Reaktions-Quotient dem Gleichgewichts-Quotienten entspricht

$$RQ = \frac{c_0[\text{Produkte}]}{c_0[\text{Edukte}]}$$

$$0 = \Delta_R G^o + R \cdot T \cdot \ln K$$

lässt die Berechnung der Gleichgewichts-Konstanten aus der Freien Enthalpie zu

$$\Delta_R G^o = -R \cdot T \cdot \ln K$$

$$K = e^{\frac{-\Delta_R G^o}{R \cdot T}}$$

## Vorhersage der Reaktions-Richtung

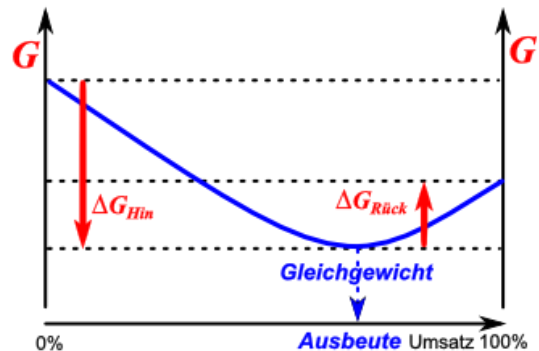
dazu vergleicht man die Gleichgewichts-Konstanten (aus dem MWG)

$$K_c = \frac{c_{\text{[Produkte]}}}{c_{\text{[Edukte]}}}$$

mit dem Reaktions-Quotienten  
der Reaktions-Quotient stellt ja praktisch die Anfangs-Situation dar

RQ ... Reaktions-Quotient

$$RQ = \frac{c_0[\text{Produkte}]}{c_0[\text{Edukte}]}$$



für praktische Abschätzung der weiteren Veränderung einer beliebigen (Ausgangs-)Situation werden die aktuellen Konzentrationen als die Ausgangs-Konzentrationen für den Reaktions-Quotienten betrachtet

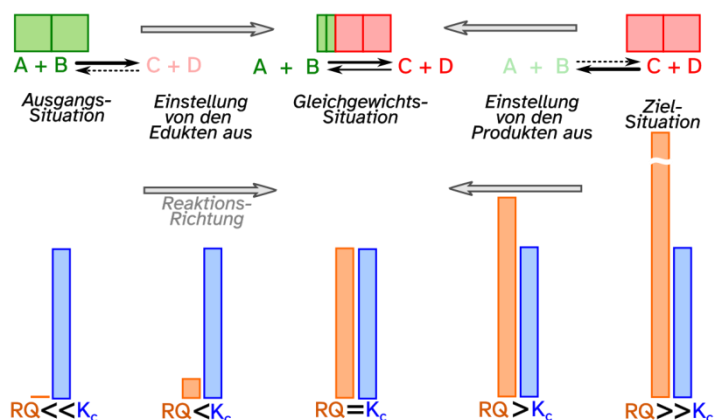
im Verlauf einer Gleichgewichts-Reaktion kommt es zu einer Annäherung des Reaktions-Quotienten an die Gleichgewichts-Konstante

ist  $K_c = RQ$ , dann befindet sich das System (bereits) im Gleichgewicht  
die "Ausgangs"-Konzentrationen (von RQ) sind äquivalent zu den Gleichgewichts-Konzentrationen

bei  $RQ > K_c$  ist das System derzeit zu den Produkten (rechte Seite der Gleichung) verschoben

die aktuellen Konzentrationen der Produkte sehr hoch (und damit die der Edukte sehr klein); dadurch ist der RQ sehr hoch  
die Rück-Reaktion läuft verstärkt ab, solange, bis die Gleichgewichts-Konzentrationen erreicht werden

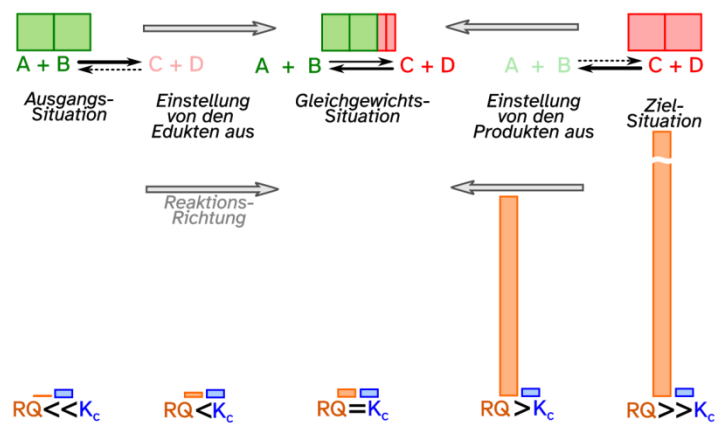
für  $RQ < K_c$  befindet sich das System noch auf der Seite der Ausgangsstoffe (linke Seite)  
die aktuellen Konzentrationen der Edukte bestimmen das Reaktions-Geschehen und führen zu einer Bevorzugung der Hin-Reaktion, das führt dann zu einer Annäherung der aktuellen Konzentrationen in Richtung Gleichgewichts-Konzentrationen



Verhältnisse für eine Gleichgewichts-Konstante  $K_c > 1$   
(Hin-Reaktion bevorzugt)



An dem Prinzip ändert auch eine andere Lage des Gleichgewichts – und damit eben verbunden ein sehr kleiner  $K_c$  – nichts.



Verhältnisse für eine Gleichgewichts-Konstante  $K_c < 1$   
(Hin-Reaktion bevorzugt)

### 5.3.2.3. spezielle chemische Gleichgewichte



Viele Vorgänge zeigen die Merkmale chemischer Reaktionen:

- Stoff-Umwandlung (es entstehen neue Stoffe mit neuen Eigenschaften)
- Energie-Umwandlung (aus dem System heraus)
- Teilchen-Umwandlung
- Umwandlung / Umbau der Bindungen

nur in einem geringen Maß. Es ist deshalb nicht immer sinnvoll, sie als "echte" chemische Reaktionen zu betrachten. Häufig behilft man sich mit physikalischen Modellen.

Besonders bei Lösungs-Vorgängen reicht es für viele Betrachtungen, die chemischen Vorgänge zu "ignorieren".

Deshalb betrachten wir hier die Löslichkeits- und Verteilungs- oder Extraktions-Gleichgewichte gesondert.

#### 5.3.2.3.1. Löslichkeits-Gleichgewichte



Im Allgemeinen meinen wir bei Lösungen immer die wässrigen Lösungen. Sachlich muss man hier aber genauer unterscheiden. Wir differenzieren nach Lösungsmittel (**Solvanz**) und gelöstem Stoff (**Solvat**). Bei einigen Stoff-Kombinationen ist eine Unterscheidung nicht möglich, weil sie sich z.B. in beliebigen Verhältnissen mischen lassen.

Der Vorgang des Lösens wird auch **Solvatisation** oder **Solvatisierung** genannt.

In vielen Klassifizierungen und Begriffs-Bestimmungen werden Lösungen als homogenes Gemisch eines anderen Stoff's (Feststoff, Flüssigkeit, Gas) in einer Flüssigkeit verstanden.

| gelöster Stoff | spez. Namen | Beispiel(e) |
|----------------|-------------|-------------|
| fest           |             |             |
| flüssig        |             |             |
| gasförmig      |             |             |

Durch eine Temperatur-Erhöhung bzw. -Erniedrigung würde bei dieser Betrachtung eine Veränderung der Gemisch-Art von statten gehen. Deshalb nehmen es andere Klassifizierungen mit dem Begriff der Lösung als Flüssigkeit nicht so genau. Sie betrachten nur die Art der Verteilung der Stoffe ineinander. Ist diese homogen, dann spricht man hier von einer Lösung. Ist das Gemisch heterogen aufgebaut, dann bleibt man beim Begriff (heterogenes) Gemisch. Diese Unterscheidung hat dann das Problem, dass der Begriff Gemisch sowohl als Oberbegriff für heterogene und homogene Gemische benutzt wird, aber eben auch nur für die (heterogenen) Gemische. Hier wird dann von Gemischen im engeren Sinne und von solchen im weiteren Sinne (also alle Gemische) gesprochen.

Echte Lösungen sind dadurch gekennzeichnet, dass die gelösten Teilchen – einzelne Moleküle oder Ionen – sehr klein sind. Sie werden von den Wasser-Teilchen umringt (hydratisiert) und verhalten sich von der Bewegung her, so wie Wasser-Teilchen. Größere Teilchen – wie z.B. Makro-Moleküle – schwimmen eher wie U-Boote im Wasser. Sie schweben vielmehr im

Wasser und bewegen sich kaum. Wir sprechen dann von kolloidalen Lösungen. Beispiele hierfür sind Stärke- oder Eiweiß-Lösungen.

In den Lehrbüchern – aber auch in der wissenschaftlichen Literatur – wird der Begriff der Lösung häufig mal so und mal so verwendet. Genaues Analysieren der Situation und der ev. vorhandenen Begriffs-Definitionen ist also immer vorteilhaft.

|                | Aggregat-Zustand | gelöster Stoff |         |      |
|----------------|------------------|----------------|---------|------|
|                |                  | gasförmig      | flüssig | fest |
| Lösungs-Mittel | gasförmig        |                |         |      |
|                | flüssig          |                |         |      |
|                | fest             |                |         |      |

In der Schul-Chemie liegt der Schwerpunkt aber eindeutig bei den wässrigen Lösungen. Werden keine weiteren Angaben zum Lösungsmittel gemacht, dann kann Wasser als solches angenommen werden.

### Aufgaben:

- 1.
2. *Auf der folgenden Seite finden Sie eine Klassifizierungs-Möglichkeit für Stoff. Verändern Sie diese so, dass Lösungen als flüssige Gemische definiert werden! Beachten Sie, dass alle betrachteten Stoff-Gruppen am Ende auch in der Klassifikation enthalten sein müssen!*
- 3.

## Wiederholung wichtiger Kenngrößen von Lösungen

Löslichkeit

Menge eines Stoffes (bei einer definierten Temperatur) die sich in einer bestimmten Menge Lösungsmittel lösen

gemeint ist die Stoffmenge des zu lösenden Stoffes in einem bestimmten Volumen Lösungsmittel

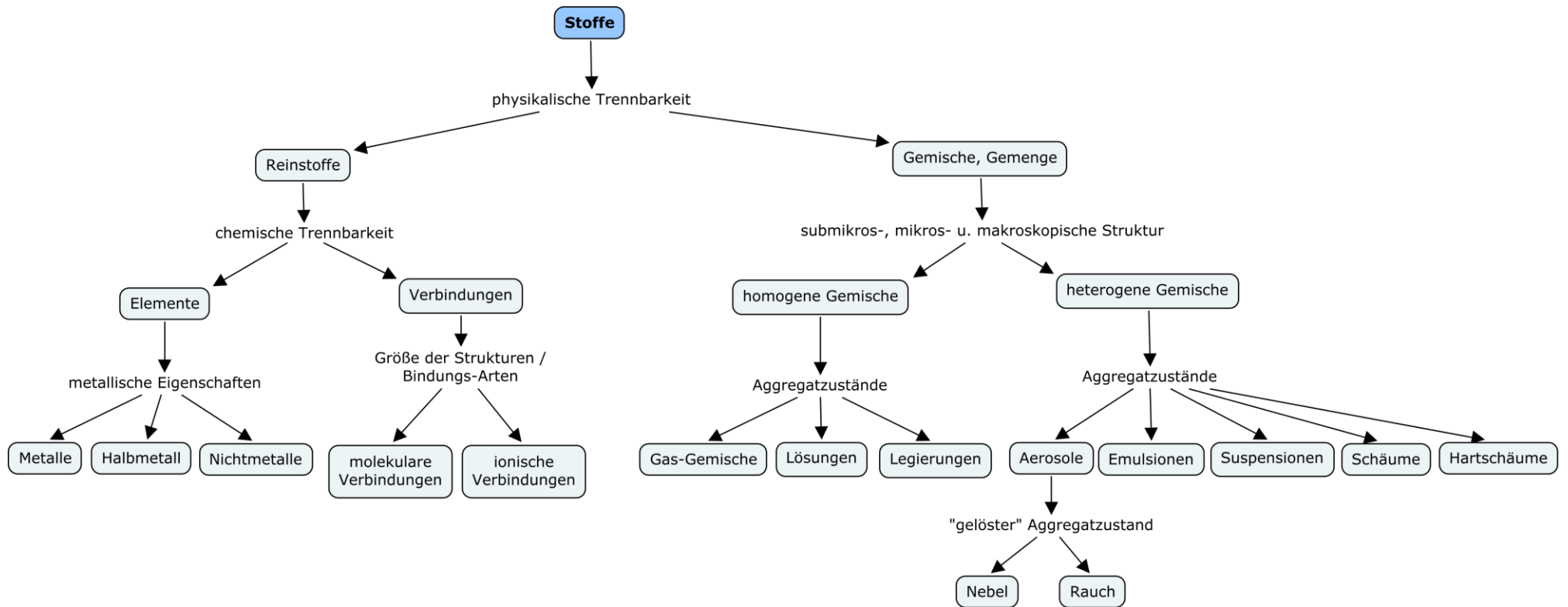
$$L = \frac{n[\text{Substanz}]}{V[\text{Lösungsmittel}]}$$

recht ähnlich zur Konzentration c

die meint die Stoffmenge, die in einem bestimmten Volumen Lösung enthalten ist

Löslichkeit unter 0,01 mol/l wird als schwerlöslich eingestuft

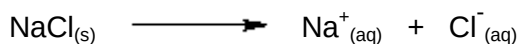
## Klassifizierung von Stoffen:



### 5.3.2.3.1.1. Löslichkeits-Gleichgewichte in wässrigen Lösungen

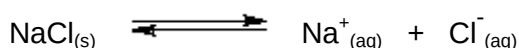


Lösen wir ein Salz in Wasser, dann brechen die Wassermoleküle die Ionen aus dem Kristall (Ionen-Gitter). Die hydratisierten Ionen können sich dann im gesamten Volumen frei verteilen (→ Diffusion).

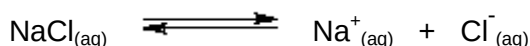


Wasser kann von den verschiedenen Ionen aber nicht beliebig viele hydratisieren. Irgendwann ist die jeweilige Kapazität erreicht. Jetzt sprechen wir von einer gesättigten Lösung.

Die weitere Zugabe des Salzes bewirkt einen Bodensatz aus ungelöstem Salz. Im Folgenden stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein. Etwas von dem Salz wird sich auflösen und etwas vom gelösten Salz wird sich wieder zu der Ionen-Verbindung zurückbilden und dann sich letztendlich absetzen.



Etwas des ungelösten Salzes verbleibt im Wasserkörper.



Die maximal lösliche Menge an Salz kann exakt bestimmt werden. Man spricht von der Löslichkeit *I*. Diese ist in Tabellen erfasst und wird meist in g / 100 g [Lsg] angegeben. Fehlt die Angabe zum Lösungsmittel (LM), dann ist Wasser gemeint.

Besonders beachten muss man hierbei, dass 100 g der Lösung gemeint sind. Diese beinhaltet das gelöste Salz und der Rest ist Lösungsmittel (z.B. Wasser). Ist die Löslichkeit eines Salzes mit 20 g / 100 g [Lsg.] angegeben, dann bedeutet dies, dass 80 g Wasser (Lösungsmittel) sind.

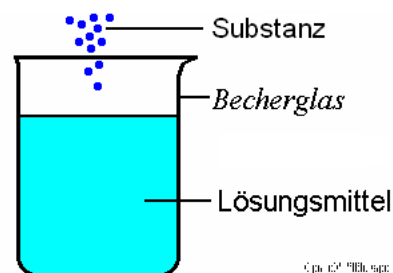
Geben wir zu einer gesättigten Lösung weiterhin Salz hinzu, finden wir diesen sofort im Bodensatz (Rückstand, Niederschlag) wieder.

Für das Lösungs-Gleichgewicht lässt sich nun auch das Massenwirkungs-Gesetz aufstellen.

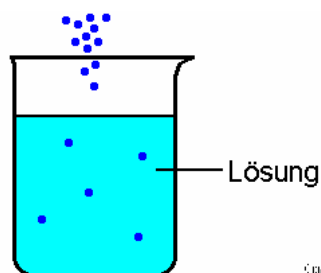
$$K_c = \frac{c[\text{Na}^+] \cdot c[\text{Cl}^-]}{c[\text{NaCl}]}$$

Alle Konzentrationen beziehen sich auf den freien Wasser-Körper (bzw. Lösungsmittel-Körper). Die Menge des Bodensatzes spielt für das eigentliche Gleichgewicht keine praktische Rolle. Das Gleichgewicht ist ja schon mit der gesättigten Lösung erreicht.

Das Massenwirkungs-Gesetz könnte also mit der kleinsten - denkbaren - Konzentration des ungelösten Salzes aufgestellt werden. Dadurch würde sich ein zu vernachlässigender Teiler ergeben. Die Vergrößerung des Bodensatzes bewirkt nichts im Gleichgewicht der Ionen in der Lösung. Es ergibt sich also keine Abhängigkeit. Somit kann Konzentration des ungelösten Salzes auch im Massenwirkungs-Gesetz gestrichen werden. Sie fließt praktisch in die Gleichgewichts-Konstante selbst ein:



© p. c. 2009-2022 lern-soft-projekt: drews



© p. c. 2009-2022 lern-soft-projekt: drews



© p. c. 2009-2022 lern-soft-projekt: drews

$$K_c \cdot c[\text{NaCl}] = c[\text{Na}^+] \cdot c[\text{Cl}^-]$$

Das MWG vereinfacht sich somit auf:

$$K_L = c[\text{Na}^+] \cdot c[\text{Cl}^-]$$

mit der neuen Konstante  $K_L$  – dem sogenannten Löslichkeits-Produkt.

Für mehr-ionige Salze müssen die Stoffmengen entsprechend als Exponenten mit einbezogen werden.

Das Löslichkeits-Produkt  $K_L$  kann als Maß für die Löslichkeit eines Salzes angesehen werden.

Allgemein gilt: Je größer  $K_L$  ist, umso besser löst sich ein Salz. Schwerlösliche Salze haben also immer sehr kleine Löslichkeits-Produkte. Je kleiner dieses ist, umso schlechter löst sich der Stoff.

Aus dem Löslichkeits-Produkt lässt sich nun auch die Konzentration jedes gelösten Ion's eines Salzes berechnen. Für Natriumchlorid ergibt sich

$$K_L = c[\text{Na}^+] \cdot c[\text{Cl}^-]$$

Da die beiden Konzentrationen gleich groß sind, können wir auch schreiben:

$$K_L = c[\text{Na}^+]^2 \quad \text{bzw.} \quad K_L = c[\text{Cl}^-]^2$$

$$c[\text{Na}^+] = \sqrt{K_L} \quad \text{bzw.} \quad c[\text{Cl}^-] = \sqrt{K_L}$$

Gerade bei Salzen, die sehr schwer löslich sind erhalten wir sehr kleine Konzentrationen für die gelösten Ionen.

Berechnet man aus solch kleinen Konzentrationen die Löslichkeits-Produkte, dann erhält man Zahlen mit unübersichtlich vielen Nachkomma-Stellen. Hier benutzt man nun eine "Umrechnung" in eine logarithmische Skala - genauso wie man es beim pH-Wert macht.

Als Formel nutzt man:

$$pK_L = -\lg K_L$$

Es wird also der negative dekadische Logarithmus der Löslichkeits-Konstanten berechnet. Man spricht dann vom **pK<sub>L</sub>-Wert** oder auch **Löslichkeits-Exponenten**.

Man kann die Passung von  $K_L$ - und pK<sub>L</sub>-Wert auch immer gut prüfen. Dazu betrachtet man den Exponenten in der Potenz-Darstellung eines Löslichkeits-Produkt's sowie die Vorkomma-Zahl des pK<sub>L</sub>-Wertes. Beide Zahlen-Beträge sollten sich nur um plus / minus 1 unterscheiden. Der Löslichkeits-Exponent soll ja auch genau diesem Exponenten entsprechen. Die Negation dient nur dazu, dass angenehmere Zahlen vorliegen.

#### Definition(en): Löslichkeits-Produkt $K_L$

Die Löslichkeits-Konstante  $K_L$  schwer löslicher Salze ist das Produkt der Konzentrationen aller Ionen (auch Ionen-Produkt genannt) dieses Salzes.

#### Definition(en): Löslichkeits-Exponent pK<sub>L</sub>

Der pK<sub>L</sub>-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Löslichkeits-Konstante.

Die Rückberechnung des  $K_L$ -Wertes aus dem  $pK_L$  erfolgt über:

$$K_L = 10^{-pK_L}$$

Die verschiedenen Löslichkeits-Kennwerte lassen sich folgendermaßen in Beziehung setzen:

Geht man von einer Reihung der Salze mit steigender Löslichkeit  $L$  aus, dann steigt auch das Löslichkeits-Produkt  $K_L$  entlang dieser Reihe.

Der  $pK_L$ -Wert sinkt aber entlang der Reihe. Dafür ist die Negation innerhalb der Definition verantwortlich. Diese wurde vorrangig deshalb eingeführt, damit typischerweise positive Werte für  $pK_L$  herauskommen.

Beispiele

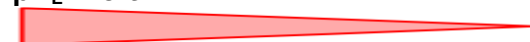
$Ag_2S$        $AgCl$        $AgNO_3$   
Löslichkeit /



Löslichkeits-Konstante  $K_L$



$pK_L$ -Wert

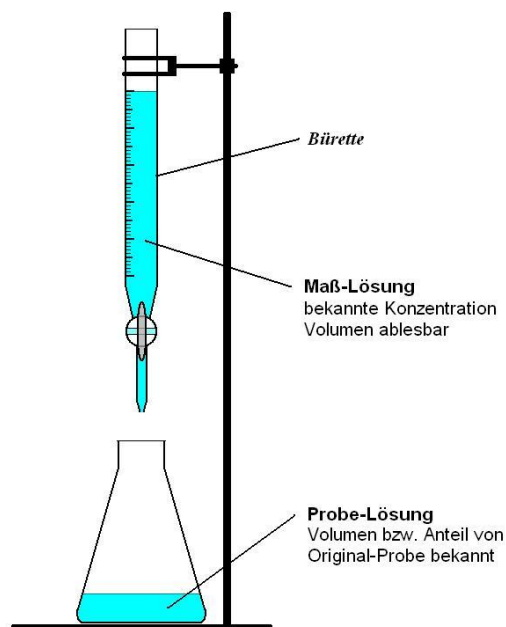


Das Löslichkeits-Produkt lässt auch wieder zur Berechnung der Löslichkeit  $l$  benutzen. I.A. gilt:

$$l[A_aB_b] = \sqrt[a+b]{\frac{K_L[A_aB_b]}{a^a \cdot b^b}} \quad \text{bzw. umgekehrt:} \quad K_L[A_aB_b] = a^a \cdot b^b \cdot l^{a+b}[A_aB_b]$$

Eine wichtige Anwendung von Fällungs-Reaktionen ist die quantitative Analyse. Bei den sogenannten Fällungs-Titrationen werden mit Hilfe von ausgewählten und Gehalt-bekannten Lösungen Niederschläge in zu untersuchenden Lösungen bewirkt. Die Maß-Lösung wird solange zugesetzt, wie sich noch neuer Niederschlag bildet. Aus der verbrauchten Maß-Lösung lässt sich dann der Gehalt der gesuchten Ionen in der Probe berechnen.

Um nicht immer auf das Absetzen des Niederschlag's warten zu müssen, nutzt man häufig Farb-Indikatoren zum Verfolgen eines der betrachteten Ionen.



---

### Aufgaben:

1. Für eine Versuchsreihe werden 10 Liter einer gesättigten Silberchlorid-Lösung benötigt. Da Silber und Silbersalze sehr teuer sind, soll nur die absolut notwendige Menge Silberchlorid gelöst werden.
  - a) Berechnen Sie die Konzentrationen der gelösten Ionen in einer gesättigten Silberchlorid-Lösung!
  - b) Ermitteln Sie die Stoffmengen für die gelösten Ionen in der gesättigten Lösung!
  - c) Berechnen Sie die einzusetzende Masse Silberchlorid, um die gesättigte Lösung herzustellen!
  - d) Der gesättigten Lösung wird nun Salzsäure zugesetzt, die exakt die gleiche Stoffmenge Chlorid-Ionen enthält, wie in der gesättigten Silberchlorid-Lösung enthalten sind. Berechnen Sie die Konzentration der Salzsäure-Lösung, wenn diese ein Volumen von 100 ml hat!

extra: dd) Welchen pH-Wert hat die Salzsäure-Lösung?

  - e) Berechnen Sie die neuen (theoretischen) Konzentrationen der Ionen in der Mischung!
  - f) Wie wirken sich die veränderten Konzentrationen auf die Löslichkeit des Silberchlorid's aus? Stellen Sie eine begründete These auf!
  - g) Berechnen Sie die tatsächliche Konzentration der gelösten Silber- und Chlorid-Ionen!
  - h) Wenn die Lösung nun noch Silberchlorid aufnehmen kann, dann berechnen Sie die notwendige Masse, um wieder eine gesättigte Lösung zu erhalten! Wenn Silberchlorid ausfällt, dann geben Sie an, wieviel Silberchlorid sich als Niederschlag absetzt!
2. Berechnen Sie alle in der Aufgabe 1 geforderten Werte, für den Fall, dass nun 125 Liter Silberiodid-Lösung angesetzt wird!

### für die gehobene Anspruchsebene:

3. Kann man das gleiche Vorgehen auch mit Silbernitrat ( $K_L = 161,63 \text{ mol}^2/\text{l}^2$ ) und einem Zusatz von Salpetersäure durchführen? Begründen Sie ihren Standpunkt! Wenn das geht, wie sähen die Werte für 5 l gesättigte Silbernitrat-Lösung aus? Wenn das nicht geht, geben Sie an, an welcher Stelle der Berechnungen nicht mehr zu realisierende Mengen auftreten!



## der Lösungs-Vorgang – thermodynamisch betrachtet

Beim Lösen eines Salzes beeinflussen zwei Energien den Vorgang.

Das eigentliche Auflösen – also das Übernehmen der Ionen durch das Wasser und die Bildung von hydratisierten Ionen – wird durch die Hydratisierungs-Energie ( $E_H$ ) charakterisiert. Zum Herauslösen aus dem Ionen-Verband (Ionen-Gitter) muss die Gitter-Energie ( $E_G$ ) überwunden werden. Sie beschreibt die bindende Kraft zwischen den Ionen. Sie wird frei, wenn sich die freien Ionen zu einem Gitter vereinen.

Ob die Auflösung exotherm oder endotherm abläuft, wird durch die Differenz von Gitter- und Hydratisierungs-Energie beschrieben:

$$\Delta_L H = \Delta E_H - \Delta E_G$$

Bei der Hydratisierungs-Energie muss die Hydratisierung aller Ionen beachtet werden. Für eine Ionen-Substanz ergibt sich die gesamte Hydratisierungs-Energie aus:

$$\Delta E_H = \Delta E_H[\text{Kationen}] + \Delta E_H[\text{Anionen}]$$

Für die Gitter-Energie gibt einen durch beide Ionen bestimmten gemeinsamen Wert.

Dieser wird z.B. durch den Ionen-Radius und die Ladungs-Größe bestimmt.

Ist die Hydratisierungs-Energie größer als die Gitter-Energie, dann ist der Löse-Vorgang exotherm. Beim Lösen wird Wärme frei.

Beispiele für solche Salze sind Calciumchlorid (Wasser-frei) und Natriumcarbonat.

Andere Stoffe, die sich exotherm lösen sind Natriumhydroxid,

Selten ist die Hydratisierungs-Energie ungefähr genauso groß, wie die die Gitter-Energie. Hier ist praktisch keine Wärmetönung zu beobachten. Natriumchlorid gehört zu diesen Salzen.

Ist dagegen die Hydratisierungs-Energie kleiner als die Gitter-Energie, dann wird weitere Energie für das Lösen gebraucht. Diese kommt aus dem Lösungsmittel und wird diesem in Form von Wärme entzogen. Die Lösung kühlt sich ab. Der Löse-Vorgang ist also endotherm.

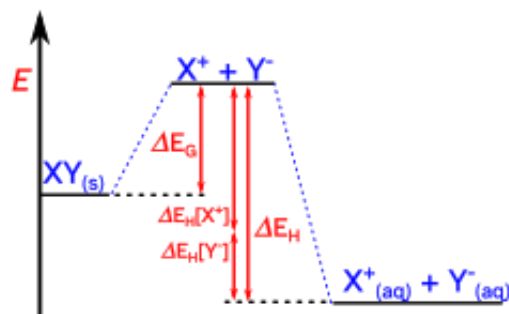
Salze, die sich endotherm lösen sind z.B.: Calciumchlorid-Hexahydrat, Ammoniumnitrat, Ammoniumchlorid, Kaliumchlorid, Kaliumcarbonat.

Harnstoff gehört zu den endotherm löslichen Stoffen.

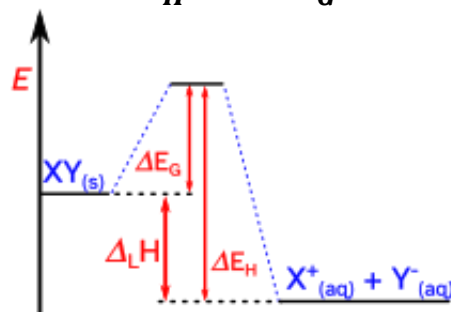
Bei manchen Salzen ist die Hydratisierungs-Energie deutlich kleiner als die Gitter-Energie – also  $\Delta E_H \ll \Delta E_G$ .

Diese Salze sind dann schwerer oder schwerlöslich.

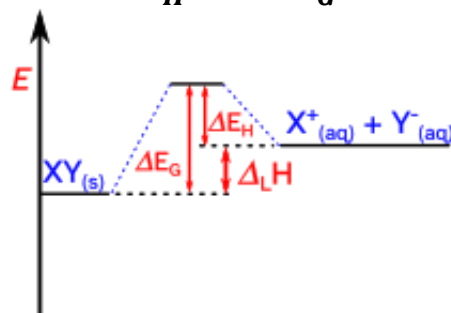
Der Begriff Schwer-Löslichkeit suggeriert also etwas falsch, dass das Wasser weniger Ionen (Stoff) aufnehmen kann. Es ist vielmehr die "Unwilligkeit" des Stoffes seine festen Bindung aufbrechen zu lassen.



$$\Delta E_H > \Delta E_G$$



$$\Delta E_H < \Delta E_G$$



Bei der Löslichkeit spielt die "Aufnahme-Fähigkeit" des Lösungsmittels aber auch eine Rolle. So passen die umlagernden Wasser-Moleküle in der einen Hydrat-Hülle sterisch besser zueinander, als bei einem anderen Ion. Solche Hydrat-Hüllen sind dann unbeständiger. Betrachtet man annähernd gleich große und gleich geladene Ionen, dann gilt: Je stabiler eine Hydrat-Hülle ist, umso besser ist das Ion löslich / hydratisierbar.



Interessant werden die Werte der Hydratisierungs- bzw. Gitter-Energien, wenn man sie in Beziehung zu Ionen-Radius und Ladungs-Größe betrachtet.

Letztendlich basieren die Hydratisierungs-Energien im Wesentlichen auf den Bau-Eigenschaften Ionen-Radius und Ladungs-Größe. So lässt sich erkennen, dass je größer die Ladung ist, umso kleiner sind im Allgemeinen die Ionen. Desweiteren sind kleine Ionen wieder durch größere Hydratisierungs-Energien gekennzeichnet.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ionen immer nach den Hydratisierungs-Energien geordnet.

Dann kann man gut Tendenzen anderer – makroskopischer – Eigenschaften ableiten.

| Kation                        | Wertigkeit | Radius [pm] | Hydratisierungs-Energie [kJ/mol] |
|-------------------------------|------------|-------------|----------------------------------|
| Al <sup>3+</sup>              | 3          | 68          | -4600                            |
| Fe <sup>3+</sup>              | 3          | 55 / 65     | -4485                            |
| Be <sup>2+</sup>              | 2          | 59          | -2500                            |
| Zn <sup>2+</sup>              | 2          | 74          | -2054                            |
| Fe <sup>2+</sup>              | 2          | 61 / 78     | -1958                            |
| Mg <sup>2+</sup>              | 2          | 86          | -1910                            |
| Hg <sup>2+</sup>              | 2          | 102         | -1820                            |
| Cd <sup>2+</sup>              | 2          | 95          | -1791                            |
| Ca <sup>2+</sup>              | 2          | 114         | -1580                            |
| Sr <sup>2+</sup>              | 2          | 132         | -1430                            |
| Ba <sup>2+</sup>              | 2          | 135         | -1290                            |
| H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> | 1          |             | -1085                            |
| Li <sup>+</sup>               | 1          | 90          | -510                             |
| Ag <sup>+</sup>               | 1          | 115         | -468                             |
| Na <sup>+</sup>               | 1          | 116         | -400                             |
| K <sup>+</sup>                | 1          | 152         | -325                             |
| Rb <sup>+</sup>               | 1          | 166         | -300                             |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 1          | 143         | -293                             |
| Cs <sup>+</sup>               | 1          | 167         | -270                             |
|                               |            |             |                                  |
| Cu <sup>+</sup>               | 1          | 77          |                                  |
| Au <sup>+</sup>               | 1          | 137         |                                  |

| Anion                        | Wertigkeit | Radius [pm] | Hydratisierungs-Energie [kJ/mol] |
|------------------------------|------------|-------------|----------------------------------|
| F <sup>-</sup>               | 1          | 119         | -510                             |
| Cl <sup>-</sup>              | 1          | 167         | -380                             |
| OH <sup>-</sup>              | 1          |             | -365                             |
| CN <sup>-</sup>              | 1          |             | -349                             |
| Br <sup>-</sup>              | 1          | 182         | -340                             |
| I <sup>-</sup>               | 1          | 206         | -300                             |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 1          |             | -256                             |
|                              |            |             |                                  |
| O <sup>2-</sup>              | 2          | 126         |                                  |
| S <sup>2-</sup>              | 2          | 170         |                                  |
| H <sup>-</sup>               | 1          | 154         |                                  |

In der folgenden Tabelle sind sowohl die Anionen, als auch die Kationen nach der Hydratisierungs-Energie geordnet. Da werden die Tendenzen der Gitter-Energie gut sichtbar.

### Gitter-Energien von Ionen-Verbindungen [kJ/mol] (bei 25 °C)

|                              | Anion        | O <sup>2-</sup> | S <sup>2-</sup> |  | F <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | OH <sup>-</sup> | Br <sup>-</sup> | I <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|--|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------------------|
| Kation                       | $\Delta E_H$ |                 |                 |  | -510           | -380            | -365            | -340            | -300           | -256                         |
| Al <sup>3+</sup>             | -4600        | 15110           |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |
| Be <sup>2+</sup>             | -2500        |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |
| Mg <sup>2+</sup>             | -1910        | 3933            | 3255            |  | 2883           | 2489            |                 | 2514            | 2314           |                              |
| Ca <sup>2+</sup>             | -1580        | 3523            | 3021            |  | 2582           | 2197            |                 | 2125            | 2038           |                              |
| Sr <sup>2+</sup>             | -1430        | 3210            | 2874            |  | 2427           | 2109            |                 | 2046            | 1954           |                              |
| Ba <sup>2+</sup>             | -1290        | 3125            | 2745            |  | 2289           | 1958            |                 | 1937            | 1841           |                              |
| Li <sup>+</sup>              | -510         |                 |                 |  | 1029           | 849             |                 | 804             | 753            |                              |
| Na <sup>+</sup>              | -400         |                 |                 |  | 915            | 781             | 719             | 743             | 699            |                              |
| K <sup>+</sup>               | -325         |                 |                 |  | 813            | 710             |                 | 679             | 643            |                              |
| Rb <sup>+</sup>              | -300         |                 |                 |  | 779            | 685             |                 | 656             | 624            |                              |
| Cs <sup>+</sup>              | -270         |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> |              |                 |                 |  |                | 684             |                 |                 |                |                              |

### Regeln zur Löslichkeit von Salzen

[Löslichkeit L < 0,01 mol/l wird als schwerlöslich eingestuft]

- Nitrate sind immer gut löslich
- alle Alkali-Metall-Salze sind in Wasser löslich
- alle Ammonium-Salze sind in Wasser löslich
- alle Acetate sind löslich
- Chloride, Bromide und Iodide sind in Wasser löslich (Ausnahmen: Chloride mit Ag<sup>+</sup>, Hg<sup>2+</sup> und Pb<sup>2+</sup>)
- Sulfate sind in Wasser löslich (Ausnahmen: Sulfate mit Sr<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup> und Pb<sup>2+</sup>)
- Sulfide sind in Wasser schwerlöslich (Ausnahmen: Sulfide mit NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Alkali-Ionen, Ca<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup> und Ba<sup>2+</sup>)
- Carbonate sind in Wasser schwerlöslich (Ausnahmen: Carbonate mit NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Alkali-Ionen, Ca<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup> und Ba<sup>2+</sup>)
- Hydroxide sind in Wasser schwerlöslich (Ausnahmen: Hydroxide mit NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Alkali-Ionen, Ca<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup> und Ba<sup>2+</sup>)
- sind bei der Mischung von Salz-Lösungen neue Kombinationen schwerlöslicher Salze möglich, dann fallen diese aus

**pK<sub>L</sub> von Ionen-Verbindungen (bei 25 °C)**

|                  | Anion            | O <sup>2-</sup> | S <sup>2-</sup> |  | F <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | OH <sup>-</sup> | Br <sup>-</sup> | I <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> |
|------------------|------------------|-----------------|-----------------|--|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Kation           | Δ E <sub>H</sub> |                 |                 |  | -510           | -380            | -365            | -340            | -300           | -256                         |                               |                               |                               |
| Al <sup>3+</sup> | -4600            |                 |                 |  |                |                 | 33,0            |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Fe <sup>3+</sup> | -4485            |                 |                 |  |                |                 | 15,1            |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Be <sup>2+</sup> | -2500            |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Zn <sup>2+</sup> | -2054            |                 |                 |  |                |                 | 16,5            |                 |                |                              |                               | 10,2                          |                               |
| Fe <sup>2+</sup> | -1958            |                 | 17,3            |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Mg <sup>2+</sup> | -1910            |                 |                 |  |                |                 | 11,0            |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Hg <sup>2+</sup> | -1820            |                 | 52,4            |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Ca <sup>2+</sup> | -1580            |                 |                 |  |                |                 | 5,4             |                 |                |                              | 4,7                           | 8,3                           |                               |
| Sr <sup>2+</sup> | -1430            |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Ba <sup>2+</sup> | -1290            |                 |                 |  |                |                 | 2,3             |                 |                |                              |                               | 8,3                           | 37,2                          |
| Li <sup>+</sup>  | -510             |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Ag <sup>+</sup>  | -468             |                 |                 |  |                | 9,7             |                 | 12,3            | 16,1           |                              |                               |                               |                               |
| Na <sup>+</sup>  | -400             |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| K <sup>+</sup>   | -325             |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Rb <sup>+</sup>  | -300             |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Cs <sup>+</sup>  | -270             |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
|                  |                  |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Pb <sup>2+</sup> |                  |                 | 28,0            |  |                | 4,7             | 15,2            |                 |                |                              | 7,7                           |                               |                               |
| Cu <sup>2+</sup> |                  |                 | 35,2            |  |                |                 |                 |                 |                |                              |                               |                               |                               |
| Mn <sup>2+</sup> |                  |                 |                 |  |                |                 | 12,7            |                 |                |                              |                               |                               |                               |

**Schmelz-Temperaturen von Ionen-Verbindungen [°C] (bei 25 °C)**

|                  | Anion            | O <sup>2-</sup> | S <sup>2-</sup> |  | F <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | OH <sup>-</sup> | Br <sup>-</sup> | I <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |  | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> |
|------------------|------------------|-----------------|-----------------|--|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------------------|--|-------------------------------|
| Kation           | Δ E <sub>H</sub> |                 |                 |  | -510           | -380            | -365            | -340            | -300           | -256                         |  |                               |
| Al <sup>3+</sup> | -4600            |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |  |                               |
| Be <sup>2+</sup> | -2500            | 2530            |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |  |                               |
| Zn <sup>2+</sup> |                  |                 |                 |  | 872            | 275             |                 |                 |                |                              |  |                               |
| Fe <sup>2+</sup> |                  |                 | 1193            |  |                |                 |                 |                 |                |                              |  |                               |
| Mg <sup>2+</sup> | -1910            | 2800            |                 |  |                | 708             |                 |                 |                |                              |  |                               |
| Ca <sup>2+</sup> | -1580            | 2600            |                 |  | 1423           |                 |                 |                 |                |                              |  | 1670                          |
| Sr <sup>2+</sup> | -1430            | 2430            |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |  |                               |
| Ba <sup>2+</sup> | -1290            | 1920            |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |  |                               |
| Li <sup>+</sup>  | -510             |                 |                 |  | 870            | 613             |                 | 550             | 460            |                              |  |                               |
| Na <sup>+</sup>  | -400             |                 |                 |  | 992            | 800             |                 | 747             | 650            |                              |  |                               |
| K <sup>+</sup>   | -325             |                 |                 |  | 855            | 770             |                 | 730             | 686            |                              |  |                               |
| Rb <sup>+</sup>  | -300             |                 |                 |  | 775            | 720             |                 | 690             | 647            |                              |  |                               |
| Cs <sup>+</sup>  | -270             |                 |                 |  | 683            | 645             |                 | 636             | 626            |                              |  |                               |
|                  |                  |                 |                 |  |                |                 |                 |                 |                |                              |  |                               |

---

## Bestimmung des Löslichkeits-Produkt's von Bariumhydroxid

### Grundlagen / Prinzipien:

#### Materialien / Geräte:

Becherglas oder ERLENMEYER-Kolben 100 ml; Bürette; Pipette 10 ml; Leitfähigkeits-Prüfer oder AMPERE-Meter, Spannungs-Quelle (5 V), 3 Experimentier-Kabel und 2 Edelstahl-Elektroden

demineralisiertes Wasser (120 ml); gesättigte Bariumhydroxid-Lösung (15 ml); Salzsäure 0,5M (20 ml)

#### Hinweise:

Experiment lässt sich gut mittels Graphik-Taschenrechner verfolgen und auswerten

#### Vorbereitung:

#### Durchführung / Ablauf:

- 100 ml demin. Wasser und 10 ml der ges. Bariumhydroxid-Lösung in das Becherglas geben
- ev. Elektroden eintauchen (ohne, dass sie sich berühren) und einen Stromkreis mit AMPERE-Meter aufbauen
- Leitfähigkeit bzw. Stromstärke messen
- 15 x jeweils 1 ml Salzsäure dazugeben und gut vermischen und die Leitfähigkeit bzw. Stromstärke messen

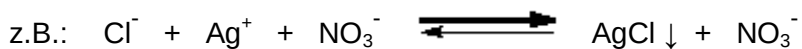
#### Aufgaben:

1. *Von einer gesättigten Blei(II)-chlorid-Lösung werden 120 ml abgefiltert und dann vorsichtig eingedampft. Der Bodensatz aus der eingedampften Lösung hat eine Masse von 0,57 g. Berechnen Sie das Löslichkeits-Produkt's des Blei(II)-chlorid's!*
2. *In einem Liter gesättigter Blei(II)-iodid-Lösung wurde der Iodid-Gehalt mit 2 mmol bestimmt. Berechnen Sie das Löslichkeits-Produkt's des Blei(II)-iodid's und den  $pK_L$ -Wert!*
3. *Berechnen Sie die Masse an gelöstem Blei in 350 ml einer gesättigten Blei(II)-sulfat-Lösung!*

## Argentometrie



quantitative Erfassung von Chlorid-, Bromid- oder Iodid-Ionen



Titrationen-Beispiel: 100 ml einer Natriumchlorid-Lösung (gesuchte / zu prüfende Konzentration an Chlorid-Ionen ( $c[\text{Cl}^-] = 0,01 \text{ M}$ ))

bekannt:  $K_L[\text{AgCl}] = 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ M}^2$

| zugegeb. Maß-Lsg. 1 M  | zugegebte Menge $\text{Ag}^+$ -Ionen | Gleichgew.-Konzentration der $\text{Ag}^+$ -Ionen (in Probe) | resultierende Gl.-Gew.-Konz. $\text{Cl}^-$ -Ionen | Titrationen-Grad |                 |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| $V_{\text{Tit}}$ in ml | n in mmol                            | $c[\text{Ag}^+]$ in M                                        | $c[\text{Cl}^-]$ in M                             | $\tau$ in %      |                 |
| 0,00                   | 0,00                                 | 0                                                            | $1,0 \cdot 10^{-2}$                               | 0                |                 |
| 0,50                   | 0,50                                 |                                                              |                                                   | 50               |                 |
| 0,90                   | 0,90                                 | $1,0 \cdot 10^{-7}$                                          | $1,0 \cdot 10^{-3}$                               | 90               |                 |
| 0,95                   | 0,95                                 |                                                              |                                                   | 95               |                 |
| 0,99                   | 0,99                                 | $1,0 \cdot 10^{-6}$                                          | $1,0 \cdot 10^{-4}$                               | 99               |                 |
| 1,00                   | 1,00                                 | $1,0 \cdot 10^{-5}$                                          | $1,0 \cdot 10^{-5}$                               | 100              | Äquivalenz-Pkt. |
| 1,01                   | 1,01                                 | $1,0 \cdot 10^{-4}$                                          | $1,0 \cdot 10^{-6}$                               | 101              |                 |
| 1,05                   | 1,05                                 |                                                              |                                                   | 105              |                 |
| 1,10                   | 1,10                                 | $1,0 \cdot 10^{-3}$                                          | $1,0 \cdot 10^{-7}$                               | 110              |                 |
| 1,50                   | 1,50                                 |                                                              |                                                   | 150              |                 |
| 2,00                   | 2,00                                 | $1,0 \cdot 10^{-2}$                                          | $1,0 \cdot 10^{-8}$                               | 200              |                 |

M ... molar, entspricht mol/l

### Aufgaben:

1. Ermitteln Sie das Löslichkeits-Produkt und den zugehörigen  $pK_L$ -Wert für Silberiodid! (Die Reihenfolge der Ermittlung ist freigestellt!)
2. Berechnen Sie die Konzentration der Barium- und der Fluorid-Ionen in einer gesättigten Bariumfluorid-Lösung!
3. Wie groß ist das Löslichkeits-Produkt und der zugehörige  $pK_L$ -Wert für eine gesättigte Silberphosphat-Lösung mit einer Konzentration von 0,0065 mol/l?
4. Erstellen Sie für die folgenden Salze (in der Reihenfolge) ein passendes Keil-Diagramm (wie oben), für die Größen  $pK_L$ ,  $L$  und  $K_L$ !

Calciumsulfat, AgBr, Cupferhydroxid, Cupfer(II)-sulfid

$pK_L [Cu(OH)_2] = 19,3$

5. Übernehmen Sie die Tabelle und kennzeichnen Sie sich die vorgegebenen Tabellen-Einträge mit einer Farbe! Berechnen und ermitteln Sie die fehlenden Tabellen-Inhalte!

| Name                | Formel    | $K_L$                 | $pK_L$ | c [Kation(en)]         | c [Anion(en)]           |
|---------------------|-----------|-----------------------|--------|------------------------|-------------------------|
| Calciumsulfat       |           |                       |        |                        |                         |
|                     | $CaF_2$   |                       | 10,4   |                        |                         |
|                     | $ZnS$     |                       |        | $4,467 \cdot 10^{-13}$ |                         |
|                     | $PbCrO_4$ | $1,99 \cdot 10^{-14}$ |        |                        |                         |
| Silber(I)-sulfid    |           |                       |        |                        | $8,9125 \cdot 10^{-26}$ |
| Eisen(III)-hydroxid |           |                       |        |                        |                         |
|                     |           |                       | 28     |                        |                         |

6. In einem 5-Liter-Behälter befindet sich eine gesättigte Lösung von Silberchlorid. Nach und nach sind aus dem Behälter 3 l Wasser verdunstet.
  - a) Berechnen Sie die Konzentrationen der Lösungen vor und nach dem Verdunsten!
  - b) Welche Masse an Silberchlorid ist insgesamt ausgefallen?
  - c) Wieviel Silber könnte man daraus zurückgewinnen?
7. Ein Niederschlag von 600 mg Silberchlorid wird mit 4 l destilliertem Wasser gewaschen, um Verunreinigungen zu entfernen. Berechnen Sie die Masse an Silberchlorid, die im Waschwasser gelöst wird! Bestimmen Sie den prozentualen Verlust an Silberchlorid durch das Waschen! (Die Verunreinigungen vernachlässigen wir!)
8. Für die schwerlöslichen Hydroxide von Aluminium und Barium wurden die Sättigungs-Konzentrationen  $2,5 \cdot 10^{-9}$  und 0,11 mol/l ermittelt. Berechnen Sie die Löslichkeits-Produkte und die Löslichkeits-Exponenten für die beiden Stoffe!
9. Um das Löslichkeits-Produkt von Magnesiumhydroxid zu bestimmen stellt man sich eine gesättigte Lösung (in demineralisiertem Wasser) her und misst den pH-Wert. Berechnen Sie aus einem gemessenen pH-Wert von 10,2 das Löslichkeits-Produkt und vergleichen Sie den praktisch ermittelten Wert mit dem Tabellen-Wert von  $8,9 \cdot 10^{-12} \text{ mol}^3/\text{l}^3$ ! Welcher pH-Wert müsste idealerweise gemessen werden?

**1x. Rohsalz aus Kalisalz-Lagerstätten enthält u.a. die Minerale Halit und Sylvin. Halit ist der Mineral-Name für Natriumchlorid, dass auch Steinsalz genannt wird. Sylvin ist chemisch gesehen Kaliumchlorid. Das Kaliumchlorid wird für die Düngemittel-Produktion verwendet. Das Steinsalz wird zu Kochsalz aufbereitet und dann verkauft.**

**Im Rohsalz sind Halit und Sylvin meist sehr stark gemischt. Gebraucht werden die reinen Salze. Beide Salze sind farblos, geruchlos und relativ gut in Wasser löslich. Die Steinsalz-Lösung schmeckt typisch salzig, die KCl-Lösung ebenfalls salzig mit einem bitteren Nachgeschmack. Die Temperatur-Abhängigkeit der Löslichkeiten unterscheidet sich aber stark (siehe Tabelle).**

| Temp.<br>[°C] | Löslichkeit in 100 g Wasser |         |
|---------------|-----------------------------|---------|
|               | NaCl [g]                    | KCl [g] |
| 0             | 35,57                       | 28,10   |
| 5             |                             | 29,60   |
| 10            | 35,68                       | 31,3    |
| 15            |                             | 32,85   |
| 20            | 35,85                       | 34,37   |
| 25            |                             | 35,98   |
| 30            | 36,08                       | 37,30   |
| 40            | 36,36                       | 40,20   |
| 50            | 36,70                       | 43,00   |
| 60            | 37,09                       | 45,56   |
| 70            | 37,54                       |         |
| 75            |                             | 49,60   |
| 80            | 38,05                       | 50,60   |
| 100           | 39,22                       | 56,00   |
| 120           |                             | 60,40   |

- Stellen Sie die Temperatur-Abhängigkeit der Löslichkeits-Werte für beide Salze in einem geeigneten Diagramm dar!**
- Berechnen Sie für beide Salze die Löslichkeits-Produkte für die Temperatur von 10, 20 und 80 °C! Machen Sie Aussagen zur Temperatur-Abhängigkeit der Löslichkeits-Produkte und erklären Sie die Tendenzen!**
- Überlegen Sie sich ein Verfahren, mit dem Sie große Mengen Halit und Sylvin trennen können! (Verunreinigen können Sie ignorieren!)**



## Störung des Löslichkeits-Gleichgewichts



### **Temperatur-Abhängigkeit**

Die meisten Salze lösen sich bei höheren Temperaturen besser in Wasser. Es gibt aber auch Ausnahmen. So beobachtet man bei Natriumchlorid eine eher konstante Löslichkeit bei verschiedenen Wasser-Temperaturen.

Cer(III)-sulfat löst sich am Besten in kaltem Wasser. bis ungefähr 20 °C sinkt die Löslichkeit, um dann relativ konstant zu bleiben.

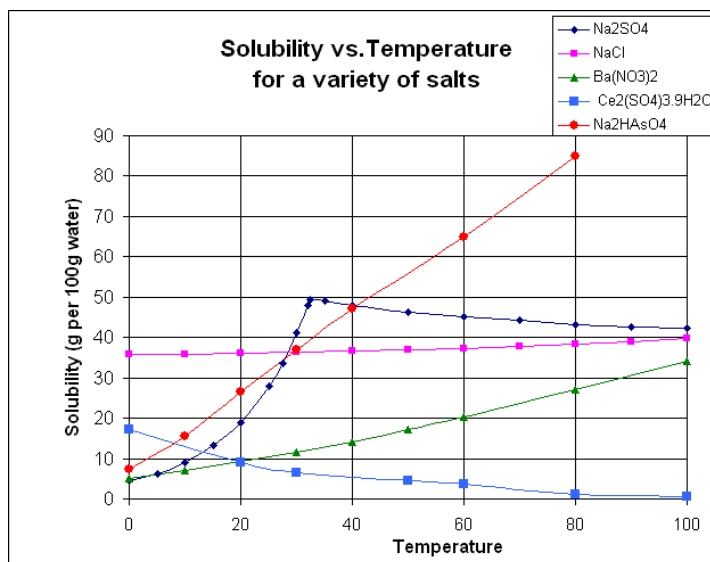
Ein völlig abnormes Lösungsverhalten zeigt Natriumsulfat. Bis ungefähr 30 °C steigt die Löslichkeit exponentiell an, um danach langsam zu fallen.

Entscheidend ist, ob der Löse-Vorgang exotherm oder endotherm abläuft. Nach dem Prinzip von LE CHATELIER werden diese Vorgänge unterschiedlich beeinflusst.

Geht man von den meisten Salzen aus, dann kann man einer bei 25 °C (Standard-Temperatur) gesättigten Lösung nach einer Temperatur-Erhöhung weiteres Salz hinzufügen. Es kann eben mehr Salz gelöst werden.

Wird nun so eine gesättigte Lösung abgekühlt, dann fällt das zuviel gelöste Salz wieder aus.

Es kann aber auch sein, dass die Kristallisation nicht gleich einsetzt. Vor allem, wenn Kristallisations-Keime fehlen, verbleibt das überschüssig gelöste Salz in der Lösung. Diese ist nun übersättigt. Die Zugabe eines einzigen Kristallisations-Keims reicht dann aus, um das Ausfällen zu starten. Man erhält die klassische gesättigte Lösung mit Bodensatz. Meist sind aber schon in der übersättigten Lösung genug Verunreinigungen oder am Gefäß kleinste Unregelmäßigkeiten, die ausreichen, um eine Kristallisation auszulösen.



Löslichkeit ausgewählter Salz  
bei verschiedenen Temperaturen  
Q: de.wikipedia.org (Walkema)

Das Temperatur-Verhalten von Salzen kann man zum **Umkristallisieren** bzw. **Reinigen** ausnutzen.

Enthält eine Lösung z.B. einige Verunreinigungen, dann kann man sich zuerst einmal durch Verdunsten lassen oder Abdampfen (des Lösungsmittels) eine gesättigte Lösung herstellen. Lässt man diese nun abkühlen, fällt das überschüssig gelöste Salz in sehr reiner Form aus. Die Verunreinigungen verbleiben in der Lösung. Diese immer noch verunreinigte Lösung kann man nun für weitere Reinigungs-Zyklen mittels Umkristallisation nutzen. Irgendwann wird die Konzentration der Verunreinigungen aber zu groß. Die Arbeits-Lösung muss dann ausgetauscht oder die Verunreinigungen mit anderen Verfahren (z.B. Fällungen) regeneriert werden.

In der chemischen Industrie (Düngemittel-Produktion) nutzt man dieses Verfahren z.B., um die Konzentration des gewünschten Kaliumchlorid's in einer Roh-Lösung zu erhöhen. Die Roh-Lösung (Sole) enthält meist noch recht viel - unerwünschtes - Natriumchlorid.

### Aufgaben:

1. Informieren Sie sich über / Recherchieren Sie das Lösungs-Verhalten von Kalium- und Natriumchlorid bei unterschiedlichen Temperaturen! Erstellen Sie ein grobes Diagramm!
2. Überlegen Sie sich ein Verfahren, mit dem Sie eine Roh-Lösung mit gleichviel gelöstem Natrium- und Kaliumchlorid weitgehend in die Bestandteile zerlegen können! Am Ende soll kristallines Salz vorliegen.
- 3.

Wenn der Lösungs-Vorgang eines Salzes exotherm abläuft, dann sinkt die Löslichkeit dieses Salzes bei Temperatur-Zufuhr.  
Ist der Lösungs-Vorgang endotherm, dann steigt die Löslichkeit des Salzes bei Temperatur-Erhöhung.

### **Zusätze gleicher / gemeinsamer Ionen**



Mischt man die gesättigten Lösungen von Magnesiumsulfat und Calciumsulfat, dann entsteht schlagartig ein Niederschlag aus Calciumsulfat. Magnesiumsulfat ist relativ gut löslich in Wasser. In der Lösung kommen sehr viele Sulfat-Ionen (und Magnesium-Ionen) vor.



Das Löslichkeits-Produkt  $K_L$  ist mit  $6,21 \text{ (mol/l)}^2$  recht groß. Die Sättigungs-Konzentration für die Sulfat-Ionen liegt also bei  $2,492 \text{ mol/l}$ . Das Gleichgewicht ist somit eher auf der Seite der dissoziierten Ionen.

Calciumsulfat gehört eher zu den schwer löslichen Salzen. In seiner gesättigten Lösung sind die Sulfat-Ionen eher rar. Das Löslichkeits-Produkt  $K_L$  wird mit  $4,9 \text{ (mol/l)}^2$  angegeben. Die Konzentration der Sulfat-Ionen ist nur  $0,007 \text{ mol/l}$  groß. Hier müssen wir die Lage des Gleichgewichts also eher auf der Seite des undissoziierten Salzes suchen.



Beim Mischen der beiden Sulfat-Lösungen entsteht eine Misch-Konzentration bezüglich der Sulfat-Ionen. Um diese zu berechnen, brauchen wir auch die Volumen der beiden Lösungen: (unter der Annahme, dass sich die Volumen hier näherungsweise addieren)

$$c[\text{SO}_4^{2-}] = \frac{n[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{MgSO}_4} + n[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{CaSO}_4}}{V[\text{MgSO}_4] + V[\text{CaSO}_4]}$$

Die einzelnen Stoffmengen lassen sich wiederum aus den bekannten Sättigungs-Konzentrationen und den Lösungs-Volumen berechnen:

Letztendlich erhalten wir – wie erwartet – einen mittleren Konzentrationswert. Wichtig ist für uns, dass dieser deutlich höher ist als die Gleichgewichts-Konzentration des Sulfat's für das schwerer lösliche Salz. Somit kommt es zu einer Neueinstellung des chemischen Gleichgewichts.

Die veränderte Konzentration wirkt sich auf das Lösungs-Gleichgewicht des Calciumsulfat's aus. Es kommt zur Verschiebung des Gleichgewichts in Richtung undissoziierten Calciumsulfat's. Dieses fällt nun aus.

Mehr Ionen der einen Art (hier: Sulfat) bedeutet im Löslichkeits-Produkt eine Verkleinerung des anderen Ion's (hier: Calcium). Die Differenz an Ionen muss in undissoziiertes Salz übergehen und dann ausfallen. In der analytischen Labor-Praxis kann man nun z.B. den Niederschlag abfiltrieren und nach dem Trocknen auswiegen und so wieder Rückschlüsse auf die enthaltenen Stoffmengen erhalten. Besonders bei sehr schwer löslichen Salzen ist diese Methode sehr genau.

Werden - wie oben - Gleichgewichte mit zusätzlichen Ionen beeinflusst, die schon in der Lösung vorhanden sind, dann sprechen wir von gleich-ionigen Zusätzen. Bei schwerlöslichen Salzen bewirken solche **gleich-ionigen Zusätze** eine **Löslichkeits-Verminderung**.

Da das Ionen-Produkt eines Salzes immer (bei ansonsten gleichen Bedingungen) konstant ist, ist z.B. die Verdopplung der Ionen-Konzentration des einen Ion's immer mit der Halbierung der Konzentration des anderen Ion's verbunden. Der andere Teil muss ausfallen.

Für ein klassisches Beispiel mit Kaliumperchlorat sieht das z.B. so aus:



Das Löslichkeits-Produkt berechnet sich über:

$$K_L[\text{KClO}_4] = c[\text{K}^+] \cdot c[\text{ClO}_4^-] \quad \text{oder mit der Löslichkeit } l: \quad K_L[\text{KClO}_4] = c[\text{K}^+] \cdot l[\text{KClO}_4]$$

Bestimmen wir zum späteren Vergleich die Löslichkeit in reinem Wasser:

$$l[\text{KClO}_4] = \sqrt{\frac{0,01 \frac{\text{mol}^2}{\text{l}^2}}{1^1 \cdot 1^1}}$$

Wird jetzt eine bekannte Lösung Kaliumchlorid zugesetzt, dann ergibt sich eine neue (Gesamt-)Konzentration der Kalium-Ionen für die gebildete Mischung. Es kommt zur Aufsummierung der Konzentrationen beider Lösungen (KClO<sub>4</sub> und KCl) i.A. kann die Konzentration des schwerlöslichen Salzes (hier KClO<sub>4</sub>) vernachlässigt werden, weil sie um Zehner-Potenzen kleiner ist. Man kann also praktisch mit der Konzentration der Kalium-Ionen aus der zugesetzten (gut-löslichen) Kaliumchlorid-Lösung weiterrechnen. Somit können wir eine neue Löslichkeit für das schwerlösliche Kaliumperchlorat in der Misch-Lösung berechnen:

$$l[\text{KClO}_4] = \frac{K_L[\text{KClO}_4]}{c[\text{K}^+]} \quad \text{bzw. bei obiger Vereinfachung:} \quad l[\text{KClO}_4] = \frac{K_L[\text{KClO}_4]}{c[\text{KCl}]}$$

Vergleicht man die Löslichkeit im reinen Wasser mit der im Gemisch (mit gleich-ionigen Zusatz), dann ergeben sich deutlich schlechte Löslichkeiten. Das korrespondiert mit unseren Beobachtungen, dass beim gleich-ionigen Zusatz neuer Niederschlag gebildet wird. Mit anderen Worten wir verzeichnen eine Löslichkeits-Erniedrigung.

### **Zusatz von Säuren zu Lösungen schwerlöslicher Salze**



Hier greifen wir jetzt etwas vor. Säuren mit ihren Gleichgewichten sind erst im nachfolgenden Abschnitt das Thema (→ [5.4.1. Säure-Base-Reaktionen](#)).

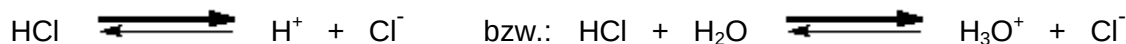
Betrachten wir z.B. die Fällungs-Reaktion einer Calciumchlorid-Lösung mit einer Natriumfluorid-Lösung:



Das schwer-lösliche Calciumfluorid steht dabei im folgenden Gleichgewicht:



Gibt man nun Salzsäure (Chlorwasserstoff-Säure) dazu, dann können auch die dissoziierten Wassertoff- (bzw. Hydronium-) Ionen



mit den Fluorid-Ionen reagieren.



Dabei liegt das Gleichgewicht (wegen  $\text{pK}_\text{S} = 3,14$  (s.a. → [5.4.1.1.8. die Stärke von Säuren und Basen](#))) auf der Seite des undissoziierten Fluorwasserstoff's. Die Konzentration des freien Fluorid's wird dadurch abgesenkt, was wiederum die Neubildung aus dem niedergeschlagenen Calciumfluorid induziert. Der Niederschlag kann sich so also auflösen.

### Aufgaben:

1. Stellen Sie Gleichungen und Formeln für den Fall auf, dass zu einer Kaliumchlorat-Lösung zusätzlich Perchlorat-Ionen zugegeben werden!
2. Berechnen Sie die Veränderung der Löslichkeit bei Zugabe einer 1 M Kaliumchlorid sowie einer 0,5 M Perchlorat-Lösung!
3. Kann man durch wiederholte Zugabe einer Kaliumchlorid-Lösung auch wiederholt neue Niederschläge beobachten? Begründen Sie Ihre Meinung!
4. Berechnen Sie die Löslichkeit von Bariumsulfat in reinem Wasser und in einer 0,2 M Schwefelsäure!
5. Eine reichlich große Probe aus Eisen(II)-sulfid wird zuerst mit 100 ml reinem Wasser und dann mit 100 ml einer 1 M Natriumsulfid-Lösung gewaschen. Berechnen Sie die jeweiligen Wasch-Verluste in mg und  $\mu\text{g}$ !
6. Überlegen Sie sich, wie sich die Wasch-Verluste verändern, wenn die Reihenfolge der Wasch-Lösungen (von Aufg. 5) getauscht wird! Berechnen Sie dann die Wasch-Verluste genau und vergleichen Sie diese mit denen von Aufg. 5!

### **Zusätze neuer Ionen**



Setzt man zu einer gesättigten Lösung eines Salzes anders-artige Ionen zu, dann kann es nun zu neuartigen Fällungs-Reaktionen zwischen den ursprünglichen und den zugesetzten Ionen kommen.

Für die gelösten Ionen gibt es natürlich kein neu oder alt, ursprünglich oder zusätzlich in der Lösung. Sie interagieren mit den anderen gelösten Ionen. Wenn dabei schwerlösliche Verbindungen entstehen, dann fallen diese eben aus.

---

Da die Fremd-Ionen aber auch die Hydrat-Hüllen der schwer-löslichen Ionen beeinflussen können, beobachtet man auch nicht selten eine Erhöhung der Löslichkeit des schwer-löslichen Salzes.

## selektives Ausfällen von Ionen



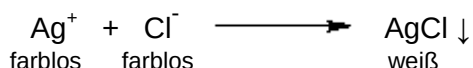
Häufig möchte man bestimmte Ionen aus Lösungen entfernen. Z.B. möchte man Ionen mit ähnlichen Niederschlägen ((fast) gleiche Färbung) in Nachweisen (→ anorganischer Trennungsgang (→ [5.5.3. Trennungs-Gänge](#))) trotzdem eindeutig ermitteln.

In der Abwasser-Reinigung von z.B. Chemie-Betrieben man z.B. wertvolle Stoffe (Salze von Edelmetallen) oder Stoffe, die wegen ihrer Giftigkeit nicht in die Natur zurückgelangen dürfen, zurückgewinnen / entfernen.

Jedes Mal wird die abgestufte Löslichkeit von Salzen / Stoffen genutzt. Wir verwenden also das gerade besprochene Zusetzen von fremden Ionen zu einer Lösung (→ Zusätze neuer Ionen).

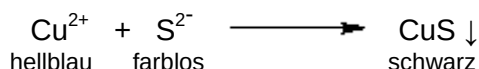
Betrachten wir z.B. ein Gemisch aus gut löslichen Cupfer- und Silber-Salzen. Das könnten z.B.  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  und  $\text{AgNO}_3$  sein.

Setzt man dieser Lösung Chlorid-Ionen - z.B. als Salzsäure - zu, dann kommt es zuerst einmal zur Ausfällung von weißem Silberchlorid.



Cupferchlorid - was sich ja auch bilden könnte - ist selbst gut löslich - fällt also nicht aus.

In der Lösung verbleiben somit die  $\text{Cu}^{2+}$ -Ionen, die Nitrat-Ionen sowie die überschüssigen Wasserstoff-Ionen aus der Säure. Diese Lösung könnte man durch Filtrieren vom Silberchlorid befreien. Will man noch die Cupfer-Ionen ausfällen, dann gelingt das mit Sulfid-Ionen ( $\text{S}^{2-}$ ; z.B. aus eingeleitetem Schwefelwasserstoff).

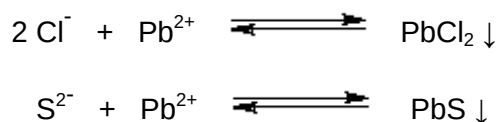


## fraktionierte Fällung



Sollen aus einer Lösung mit zwei auszufällenden Ionen, die mit dem gleichen komplementären Ion ausgefällt werden können, dann gelingt das schrittweise (fraktioniert) hintereinander, wenn sich die Löslichkeits-Exponenten um mehrere Zähler unterscheiden.

Betrachten wir das Beispiel einer Lösung mit Chlorid- und Sulfid-Ionen. Als Fällungs-Ion soll Blei(II)-Ionen (aus Bleinitrat) benutzt werden.



Der Löslichkeits-Exponent von Bleisulfid ist 27,5 und der für Bleichlorid rund 4,7.

Gibt man zu der Chlorid-Sulfid-Lösung auch nur einen einzigen Tropfen Bleinitrat, dann bildet sich sofort sehr schwer-lösliches, schwarzes Bleisulfid. Die Fällung beginnt schon bei:

$$c[\text{Pb}^{2+}] = \frac{K_L [\text{PbS}]}{c[\text{S}^{2-}]}$$

Mit den nächsten Tropfen werden die restlichen Sulfid-Ionen ausgefällt. Von den zugesetzten Blei-Ionen sind in der Lösung kaum welche nachzuweisen. Steigert man die Menge an zuge-

setzten Blei-Ionen weiter, dann sind irgendwann alle Sulfid-Ionen ausgefällt. Jetzt steigt auch die Konzentration der Blei-Ionen in der Lösung. Irgendwann fällt nun auch weißes Bleichlorid aus, da dann dessen Löslichkeits-Produkt von  $2,12 \cdot 10^{-5} \text{ M}^2$  erreicht wird. Dessen Fällung beginnt bei:

$$c[\text{Pb}^{2+}] = \frac{K_L [\text{PbCl}_2]}{c[\text{Cl}^-]^2}$$

Die Blei-Ionen sind natürlich gemeinsam für die Chlorid- und Sulfid-Ionen in der Lösung verfügbar. damit gilt:

$$c[\text{Pb}^{2+}] = \frac{K_L [\text{PbCl}_2]}{c[\text{Cl}^-]^2} = \frac{K_L [\text{PbS}]}{c[\text{S}^{2-}]}$$

Hieraus lässt sich das Verhältnis der beiden vorgelegten Ionen berechnen, für die diese fraktionierte Fällung funktioniert:

$$\frac{c[\text{S}^{2-}]}{c[\text{Cl}^-]^2} = \frac{K_L [\text{PbS}]}{K_L [\text{PbCl}_2]} = \frac{3,4 \cdot 10^{-28}}{2,1 \cdot 10^{-5}} = 1,6 \cdot 10^{-23}$$

Das ist bei einem so großen / kleinen Verhältnis praktisch immer gegeben.

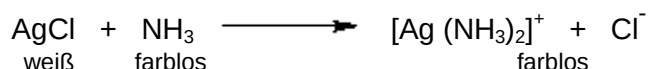
Auch Chlorid- und Iodid-Ionen lassen so fraktioniert ausfällen. Hier liegt das Trennungs-Verhältnis allerdings bei rund  $1 \cdot 10^{-6}$ , was nicht immer gegeben sein muss.

Allgemein gilt, dass eine fraktionierte Fällung umso besser funktioniert, je größer die Differenz zwischen den Löslichkeits-Exponenten (oder auch den Löslichkeits-Produkten) ist.

Die fraktionierte Fällung wird auch beim anorganischen Kationen-Trennungsgang (→ [5.5.3. Trennungs-Gänge](#)) ausgenutzt.

### Zusätze von Komplex-Bildner

Eine trübe (weißliche) Silberchlorid-Lösung - z.B. aus einer frischen Fällung - kann mit konzentrierter Ammoniak-Lösung vollständig in Lösung gebracht werden:



Das Ammoniak umlagert dabei das Silber-Ion. Es entsteht ein sogenannter Komplex (→ [5.4.4. Komplex-Reaktionen](#)). In diesem Fall der **Diamminsilber**-Komplex. Das Ammoniak wirkt als Lösungs-Vermittler. Ein Silber-Ion hängt praktisch zwischen den zwei Ammoniak-Molekülen. Die Komplex-Bindung als solche ist nicht sehr stark. Man kann sie gut mit Wasserstoff-Brücken-Bindungen vergleichen. Sehr häufig verändert sich bei Komplexbildungs-Reaktionen die Farbe der Lösung, da die lockeren Komplex-Bindungen sehr bewegliche Elektronen beinhalten, die nun andersartig mit dem Licht wechselwirken können.

Die Reaktion von Silberchlorid mit Ammoniak kann zum Unterscheiden von den anderen Silberhalogeniden Silberbromid und Silberiodid genutzt werden. Beide lösen sich nicht unter dem Einfluss von Ammoniak.

## Amphoterie



Viele Metalloxide oder Metallhydroxide sind in Wasser schlecht löslich. Macht man die Lösung durch Zusatz von starker Säure oder Base sauer bzw. basisch, dann lösen sie sich auf. Dies gelingt deshalb, weil die Metalloxide bzw. Metallhydroxide in Lösungen sowohl als Base oder Säure reagieren können. (weitere Informationen: → [5.4.1. Säure-Base-Reaktionen](#))  
Da die genannten Stoffe sowohl mit Säure oder mit einer Base reagieren können, nennt man sie amphotere Stoffe.

## Auflösung von schwerlöslichen Silberhalogeniden über Komplex-Bildungen

### Löslichkeit von Silberhalogeniden

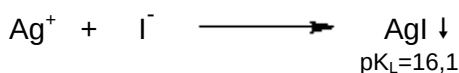
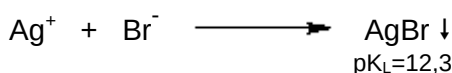
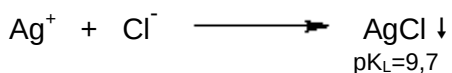
#### Materialien / Geräte:

Reagenzglas; Pipetten od. Pipetten-Fläschchen für die Lösungen; Kaliumchlorid (fest); demin. Wasser; Silbernitrat-Lösung; verdünnte Ammoniak-Lösung; Kaliumbromid-Lösung; Natriumthiosulfat-Lösung; Kaliumiodid-Lösung

#### Durchführung / Ablauf:

- eine Spatelspitze Kaliumchlorid in 3 ml demin. Wasser auflösen
- Zugabe der folgenden Lösungen immer soviel, dass ein deutlicher Effekt eintritt (Niederschlag oder Auflösung); Reagenzglas schütteln; jeweils immer Beobachtungen notieren
  1. Silbernitrat
  2. verdünnte Ammoniak-Lösung
  3. Kaliumbromid
  4. Natriumthiosulfat
  5. Kaliumiodid

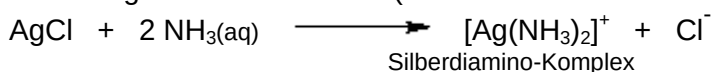
#### Bildungs-Reaktionen der Silberhalogenide:



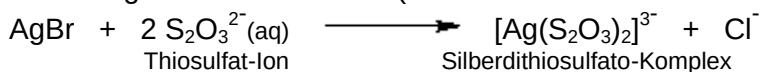
|        | AgCl               | AgBr               | AgI                |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $K_L$  | $2 \cdot 10^{-10}$ | $5 \cdot 10^{-13}$ | $8 \cdot 10^{-17}$ |
| $pK_L$ | 9,7                | 12,3               | 16,1               |

#### Komplex-Bildungen:

Auflösung des Silberchlorid's (mit verd. Ammoniak-Lösung)



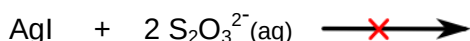
Auflösung des Silberbromid's (mit Natriumthiosulfat-Lösung)



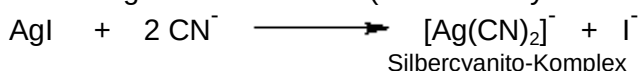


---

Silberiodid löst sich bei Zusatz von Thiosulfat-Lösung **nicht** auf



Auflösung des Silberiodid's (mit Kaliumcyanid-Lösung) (kein Schul-Experiment)



**Links:**

<https://lp.uni-goettingen.de/get/text/2011> (Versuch, Erklärung; Video's)

**Strategie zur Bearbeitung von Aufgaben / Problemen rund um Löslichkeits-Gleichgewichte**

1. Reaktions-Gleichung(en) aufstellen
  - 1a. ev. Kennzeichnen, welche der Teilreaktionen (Hin- oder Zurück-) bevorteilt ist
2. Erfassen der gegebenen und gesuchten Größen / Werte (Achtung!: Auf ev. Bedingungen zu den Größen und Werten achten!)
- 2a. ev. vereinfachte Situations-Skizzen anfertigen
3. prüfen ob ein  $K_L$  oder  $pK_L$  gegeben oder im Tafelwerk verfügbar ist
4. Aufstellen des Löslichkeits-Produkt's  $K_L$
5. WENN nur ein Wert in der Gleichung unbekannt ist, DANN nach diesem umstellen und den Wert berechnen; weiter bei 8.
6. WENN mehrere Werte unbekannt sind, DANN prüfen, ob Werte gleich oder zu ersetzen sind (z.B. stöchiometrisch bedingte Konzentrationen usw. usf.); weiter bei 8.
7. WENN keine Lösung über das Löslichkeits-Produkt möglich ist, DANN weitere Formeln / Gleichungen aus dem Tafelwerk probieren ODER Abwandlungen der Gleichungen in Betracht ziehen (sinngemäß weiter bei 5.)
8. Prüfen, ob Aufgabe / Problem gelöst ist, DANN ENDE, SONST weiter bei 5.

### Aufgaben:

1. Stellen Sie die Löslichkeits-Produkte für die folgenden Salze auf!

- |                             |                             |                                 |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| a) NaBr                     | b) $\text{NH}_4\text{NO}_3$ | c) $\text{AlCl}_3$              |
| d) $\text{Na}_2\text{SO}_3$ | e) $\text{KHSO}_4$          | f) $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ |

2. Berechnen Sie die Sättigungs-Konzentrationen aller Ionen für die folgenden Salze!

- |                    |                              |                    |
|--------------------|------------------------------|--------------------|
| a) $\text{CaCO}_3$ | b) AgCl                      | c) $\text{CaCl}_2$ |
| d) $\text{AlCl}_3$ | e) $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ | f) AgCl + AgI      |

3. Kesselstein ist eine der unangenehmen Ablagerungen z.B. in Wärmetauschern oder Wasserkochern! Einer der Stoffe, die hier beteiligt sind, ist Calciumcarbonat.

a) Stellen Sie das Löslichkeits-Produkt für Calciumcarbonat auf!

b) Berechnen Sie die Sättigungs-Konzentrationen für alle Ionen!

c) Einer gesättigten Calciumcarbonat-Lösung wird eine gesättigte Lösung von Natriumcarbonat zugesetzt. Stellen Sie Vermutungen über den weiteren Verlauf des Vorgangs auf! Begründen Sie diese!

d) Einer gesättigten Calciumcarbonat-Lösung mit einem geringfügigen Niederschlag an Salz wird eine gesättigte Lösung aus Calciumchlorid zugesetzt. Stellen Sie Vermutungen über den weiteren Verlauf des Vorgangs auf! Begründen Sie diese!

e) Statt dem Calciumchlorid (von Aufgabe d)) wird nun Kaliumchlorid benutzt. Stellen Sie Vermutungen über den weiteren Verlauf des Vorgangs auf! Begründen Sie diese!

f) Berechnen Sie die Löslichkeit  $l$  aus dem Löslichkeits-Produkt!

(verschiedene Tabellenwerte:  $M = \text{g/mol}$ ;  $\rho_{(s)} = \text{g/cm}^3$ ;  $\rho_{(\text{ges. Lsg.})} = 1,0 \text{ g/cm}^3$ ;  $K_L = 4,7 \cdot 10^{-9} (\text{mol/l})^2$ ;

4. Mit wieviel Liter Wasser muss man auffüllen, um 28 g Lithiumcarbonat gerade so auflösen zu können?

5. In einem 10-Liter-Behälter befinden sich 3,5 l einer Lösung aus Calciumsulfat mit einem Bodensatz von 3 g! Kann der Bodensatz durch das vollständige Auffüllen mit Wasser aufgelöst werden? Berechnen Sie genau!

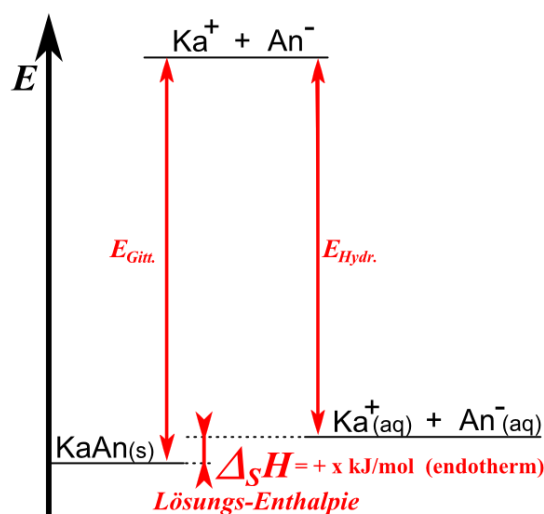
6. In einem mit Calcium- und Eisen(II)-carbonat gesättigtem See findet man auch entsprechende Ablagerungen. Berechnen Sie das Stoffmengen-Verhältnis der Calcium- und der Eisen(II)-Ionen zueinander im See-Wasser!

| Anionen-Salz-Gruppe | PSE-Haupt-Gruppe | PSE-Periode                        |                                    |                                    |                                    |
|---------------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                     |                  | 2                                  | 3                                  | 4                                  | 5                                  |
| Sulfate             | I                | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>     | Rb <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    | Cs <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>    |
|                     |                  |                                    |                                    |                                    |                                    |
|                     | II               | MgSO <sub>4</sub>                  | CaSO <sub>4</sub>                  | SrSO <sub>4</sub>                  | BaSO <sub>4</sub>                  |
|                     |                  |                                    |                                    |                                    |                                    |
| Carbonate           | I                | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>    | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>     | Rb <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>    | Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>    |
|                     |                  |                                    |                                    |                                    |                                    |
|                     | II               | MgCO <sub>3</sub>                  | CaCO <sub>3</sub>                  | SrCO <sub>3</sub>                  | BaCO <sub>3</sub>                  |
|                     |                  |                                    |                                    |                                    |                                    |
| Chlorate            | I                | NaClO <sub>4</sub>                 | KClO <sub>4</sub>                  | RbClO <sub>4</sub>                 | CsClO <sub>4</sub>                 |
|                     |                  |                                    |                                    |                                    |                                    |
|                     | II               | Mg(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> | Ca(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> | Sr(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> | Ba(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> |
|                     |                  |                                    |                                    |                                    |                                    |
| Hydroxide           | I                | NaOH                               | KOH                                | RbOH                               | CsOH                               |
|                     |                  |                                    |                                    |                                    |                                    |
|                     | II               | Mg(OH) <sub>2</sub>                | Ca(OH) <sub>2</sub>                | Sr(OH) <sub>2</sub>                | Ba(OH) <sub>2</sub>                |
|                     |                  |                                    |                                    |                                    |                                    |

mit zunehmender Ladung und auch mit abnehmender Ionen-Größe steigt der Betrag der Gitter-Energie und auch der Betrag der Hydratisierungs-Enthalpie

Kombination aus beiden Werten ist sehr komplex und bestimmt die Löslichkeit, innerhalb einer Reihe ist meist eine gleichgerichtete Veränderung zu beobachten

bei Salzen mit großen Anionen verändert sich die Gitter-Energie auch bei unterschiedlicher Kationen-Größe nur wenig



Löslichkeit sinkt i.A. mit steigender Ionen-Ladung (z.B. Erdalkali-Salze schlechter löslich als vergleichbare Alkali-Salze)

| Kationen-Salz-Gruppe | PSE-Haupt-Gruppe | PSE-Periode       |                   |      |     |
|----------------------|------------------|-------------------|-------------------|------|-----|
|                      |                  | 2                 | 3                 | 4    | 5   |
| Silber               | VI<br>Chalkogene | Ag <sub>2</sub> O | Ag <sub>2</sub> S |      |     |
|                      |                  |                   |                   |      |     |
|                      | VII<br>Halogene  | AgF               | AgCl              | AgBr | AgI |
|                      |                  |                   |                   |      |     |
| Lithium              | VI<br>Chalkogene | Li <sub>2</sub> O | Li <sub>2</sub> S |      |     |
|                      |                  |                   |                   |      |     |
|                      | VII<br>Halogene  | LiF               | LiCl              | LiBr | LiI |
|                      |                  |                   |                   |      |     |

große Kationen lassen sich besser deformieren und haben eine geringere Hydratisierungs-Energie

### Versuch: Leitfähigkeits- und pH-Wert-Veränderung bei einer Fällung

#### Durchführung:

- Versuch kann gut mit einem Daten-Logger / Meßwert-Erfassungssystem / geeignetem Taschenrechner aufgezeichnet werden
- Leitfähigkeit und pH-Wert müssen in getrennten Versuchen aufgezeichnet / ermittelt werden, da die Sensoren sich gegenseitig beeinflussen!
- 30 ml gesättigte Calciumhydroxid-Lösung in ein hohes Becherglas oder einen ERLLEN-MEYER-Kolben geben und Sensor eintauchen
- über ein Glas-Rohr / Trink-Halm Ausatem-Luft oder reinen Kohlendioxid einleiten



## Löslichkeit ausgewählter Verbindungen

| Substanz                     | Formel                                                             | Löslichkeitsprodukt $K_L$<br>bei geg. Temp. [mol <sup>x</sup> /l <sup>x</sup> ]                          | x für<br>Einheit | pK <sub>L</sub> |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| Aluminiumhydroxid            | Al(OH) <sub>3</sub>                                                | 4,00*10 <sup>-13</sup> (15°C)<br>1,50*10 <sup>-15</sup> (18°C)<br><b>3,70*10<sup>-15</sup> (25°C)</b>    | 4                |                 |
| Arsen(III)-sulfid            | As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                     | 4,00*10 <sup>-29</sup> (18°C)                                                                            | 5                |                 |
| Bariumcarbonat               | BaCO <sub>3</sub>                                                  | 7,00*10 <sup>-9</sup> (16°C)<br><b>8,10*10<sup>-9</sup> (25°C)</b>                                       | 2                |                 |
| Bariumchromat                | BaCrO <sub>4</sub>                                                 | 1,60*10 <sup>-10</sup> (18°C)<br>2,40*10 <sup>-10</sup> (28°C)                                           | 2                |                 |
| Bariumfluorid                | BaF <sub>2</sub>                                                   | 1,60*10 <sup>-6</sup> (10°C)<br>1,70*10 <sup>-6</sup> (18°C)                                             | 3                |                 |
| Bariumoxalat                 | BaC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> * 2H <sub>2</sub> O                | 1,20*10 <sup>-7</sup> (18°C)                                                                             | 2                |                 |
| Bariumsulfat                 | BaSO <sub>4</sub>                                                  | 8,70*10 <sup>-11</sup> (18°C)<br><b>1,08*10<sup>-10</sup> (25°C)</b><br>1,98*10 <sup>-10</sup> (50°C)    | 2                |                 |
| Berylliumhydroxid            | Be(OH) <sub>2</sub>                                                | 2,70*10 <sup>-19</sup> (25°C)                                                                            | 3                |                 |
| Bismuthydroxid               | Bi(OH) <sub>3</sub>                                                | 4,30*10 <sup>-31</sup> (18°C)                                                                            | 4                |                 |
| Bismutoxidchlorid            | BiOCl                                                              | 1,60*10 <sup>-31</sup> (25°C)                                                                            | 2                |                 |
| Bismutsulfid                 | Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>                                     | 1,60*10 <sup>-72</sup> (18°C)                                                                            | 5                |                 |
| Blei(II)-bromid              | PbBr <sub>2</sub>                                                  | 3,90*10 <sup>-5</sup> (25°C)                                                                             | 3                |                 |
| Blei(II)-carbonat            | PbCO <sub>3</sub>                                                  | 3,30*10 <sup>-14</sup> (25°C)                                                                            | 2                |                 |
| Blei(II)-chlorid             | PbCl <sub>2</sub>                                                  | 2,12*10 <sup>-5</sup> (25°C)                                                                             | 3                |                 |
| Blei(II)-chromat             | PbCrO <sub>4</sub>                                                 | 1,77*10 <sup>-14</sup> (25°C)                                                                            | 2                |                 |
| Blei(II)-fluorid             | PbF <sub>2</sub>                                                   | 2,70*10 <sup>-8</sup> (9°C)<br>3,20*10 <sup>-8</sup> (18°C)                                              | 3                |                 |
| Blei(II)-iodid               | PbI <sub>2</sub>                                                   | 7,50*10 <sup>-9</sup> (15°C)<br><b>1,40*10<sup>-9</sup> (25°C)</b>                                       | 3                |                 |
| Blei(II)-iodat               | Pb(IO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                  | 5,30*10 <sup>-14</sup> (9,2°C)<br>1,20*10 <sup>-13</sup> (18°C)<br><b>2,60*10<sup>-13</sup> (25,8°C)</b> | 3                |                 |
| Bleioxalat                   | PbC <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                    | 2,74*10 <sup>-11</sup> (18°C)                                                                            | 2                |                 |
| Bleisulfat                   | PbSO <sub>4</sub>                                                  | 1,06*10 <sup>-8</sup> (18°C)                                                                             | 2                |                 |
| Bleisulfid                   | PbS                                                                | 3,40*10 <sup>-28</sup> (18°C)                                                                            | 2                |                 |
| Cadmiumcarbonat              | CdCO <sub>3</sub>                                                  | 2,50*10 <sup>-14</sup> (25°C)                                                                            | 2                |                 |
| Cadmiumoxalat                | CdC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> * 3H <sub>2</sub> O                | 1,53*10 <sup>-8</sup> (18°C)                                                                             | 2                |                 |
| Cadmiumsulfid                | CdS                                                                | 3,60*10 <sup>-29</sup> (18°C)                                                                            | 2                |                 |
| Calciumcarbonat              | CaCO <sub>3</sub>                                                  | 4,80*10 <sup>-9</sup> (25°C)                                                                             | 2                |                 |
| Calciumfluorid               | CaF <sub>2</sub>                                                   | 3,40*10 <sup>-11</sup> (18°C)<br><b>3,95*10<sup>-11</sup> (26°C)</b>                                     | 3                |                 |
| Calciumhydroxid              | Ca(OH) <sub>2</sub>                                                | 5,47*10 <sup>-6</sup> (18°C)                                                                             | 3                |                 |
| Calciumoxalat                | CaC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> * H <sub>2</sub> O                 | 1,78*10 <sup>-9</sup> (18°C)<br><b>2,57*10<sup>-9</sup> (25°C)</b>                                       | 2                |                 |
| Calciumphosphat              | Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                    | 1,00*10 <sup>-25</sup> (25°C)                                                                            | 5                |                 |
| Calciumsulfat                | CaSO <sub>4</sub>                                                  | 6,10*10 <sup>-5</sup> (10°C)<br><b>2,45*10<sup>-5</sup> (25°C)</b>                                       | 2                |                 |
| Calciumtartrat               | CaC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> * 2H <sub>2</sub> O | 7,70*10 <sup>-7</sup> (25°C)                                                                             | 2                |                 |
| Cobalt(II)-carbonat          | CoCO <sub>3</sub>                                                  | 1,00*10 <sup>-12</sup> (25°C)                                                                            | 2                |                 |
| Cobalt(II)-sulfid            | CoS                                                                | 1,90*10 <sup>-27</sup> (20°C)                                                                            | 2                |                 |
| Eisen(II)-carbonat           | FeCO <sub>3</sub>                                                  | 2,50*10 <sup>-11</sup> (20°C)                                                                            | 2                |                 |
| Eisen(II)-hydroxid           | Fe(OH) <sub>2</sub>                                                | 1,64*10 <sup>-14</sup> (18°C)                                                                            | 3                |                 |
| Eisen(III)-hydroxid          | Fe(OH) <sub>3</sub>                                                | 1,10*10 <sup>-36</sup> (18°C)                                                                            | 4                |                 |
| Kaliumperchlorat             | KClO <sub>4</sub>                                                  | 1,07*10 <sup>-2</sup> (25°C)                                                                             | 2                |                 |
| Kaliumhydrogentartrat        | KHC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub>                     | 3,80*10 <sup>-4</sup> (18°C)                                                                             | 3                |                 |
| Kaliumhexachloroplatinat(IV) | K <sub>2</sub> PtCl <sub>6</sub>                                   | 1,10*10 <sup>-5</sup> (18°C)                                                                             | 3                |                 |
| Kupfer(I)-bromid             | CuBr                                                               | 4,15*10 <sup>-8</sup> (18-20°C)                                                                          | 2                |                 |
| Kupfer(I)-carbonat           | CuCO <sub>3</sub>                                                  | 1,37*10 <sup>-10</sup> (25°C)                                                                            | 2                |                 |
| Kupfer(I)-chlorid            | CuCl                                                               | 1,02*10 <sup>-6</sup> (18-20°C)                                                                          | 2                |                 |

| Substanz                  | Formel                            | Löslichkeitsprodukt bei geg. Temp. in mol <sup>x</sup> /l <sup>x</sup>                                                                                                    | x für Einheit | pK <sub>L</sub> |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------|
| Kupfer(II)-hydroxid       | Cu(OH) <sub>2</sub>               | 5,60*10 <sup>-20</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 3             |                 |
| Kupfer(I)-iodid           | CuI                               | 5,06*10 <sup>-12</sup> (18-20°C)                                                                                                                                          | 2             |                 |
| Kupfer(I)-sulfid          | Cu <sub>2</sub> S                 | 2,00*10 <sup>-47</sup> (18°C)                                                                                                                                             | 3             |                 |
| Kupfer(II)-sulfid         | CuS                               | 8,00*10 <sup>-45</sup> (18°C)                                                                                                                                             | 2             |                 |
| Kupfer(I)-thiocyanat      | CuSCN                             | 1,60*10 <sup>-11</sup> (18°C)                                                                                                                                             | 2             |                 |
| Lanthanhydroxid           | La(OH) <sub>3</sub>               | ~*10 <sup>-20</sup> (25°C)                                                                                                                                                | 4             |                 |
| Lithiumcarbonat           | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>   | 1,70*10 <sup>-3</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 5             |                 |
| Magnesiumammoniumphosphat | MgNH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub> | 2,5*10 <sup>-13</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 3             |                 |
| Magnesiumcarbonat         | MgCO <sub>3</sub>                 | 2,60*10 <sup>-5</sup> (12°C)                                                                                                                                              | 2             |                 |
| Magnesiumfluorid          | MgF <sub>2</sub>                  | 7,10*10 <sup>-9</sup> (18°C)                                                                                                                                              | 3             |                 |
| Magnesiumhydroxid         | Mg(OH) <sub>2</sub>               | 1,20*10 <sup>-11</sup> (18°C)                                                                                                                                             | 3             |                 |
| Mangancarbonat            | MnCO <sub>3</sub>                 | 8,80*10 <sup>-10</sup> (18°C)                                                                                                                                             | 2             |                 |
| Mangansulfid              | MnS                               | 7,00*10 <sup>-16</sup> (18°C)                                                                                                                                             | 2             |                 |
| Nickel(II)-carbonat       | NiCO <sub>3</sub>                 | 1,35*10 <sup>-7</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 2             |                 |
| Nickel(II)-hydroxid       | Ni(OH) <sub>2</sub>               | 1,6*10 <sup>-14</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 3             |                 |
| Nickel(II)-sulfid         | NiS                               | 1,00*10 <sup>-26</sup> (20°C)                                                                                                                                             | 2             |                 |
| Quecksilber(I)-bromid     | Hg <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>   | 1,30*10 <sup>-21</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 4             |                 |
| Quecksilber(I)-chlorid    | Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>   | 2,00*10 <sup>-18</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 4             |                 |
| Quecksilber(I)-chromat    | Hg <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>  | 2,00*10 <sup>-9</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 3             |                 |
| Quecksilber(I)-cyanid     | Hg <sub>2</sub> (CN) <sub>2</sub> | 5,00*10 <sup>-40</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 4             |                 |
| Quecksilber(I)-iodid      | Hg <sub>2</sub> I <sub>2</sub>    | 1,20*10 <sup>-28</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 4             |                 |
| Quecksilber(II)-iodid     | HgI <sub>2</sub>                  | 3,20*10 <sup>-29</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 3             |                 |
| Quecksilber(I)-oxid       | Hg <sub>2</sub> O                 | 1,60*10 <sup>-23</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 3             |                 |
| Quecksilber(II)-oxid      | HgO                               | 1,70*10 <sup>-26</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 2             |                 |
| Quecksilber(I)-sulfid     | Hg <sub>2</sub> S                 | 1,00*10 <sup>-47</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 3             |                 |
| Quecksilber(II)-sulfid    | HgS                               | 3,00*10 <sup>-54</sup> (18°C)                                                                                                                                             | 2             |                 |
| Silberarsenat             | Ag <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>  | 1,00*10 <sup>-19</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 4             |                 |
| Silberbromid              | AgBr                              | 4,10*10 <sup>-13</sup> (18°C)<br><b>7,70*10<sup>-13</sup> (25°C)</b>                                                                                                      | 2             |                 |
| Silberchlorid             | AgCl                              | 0,21*10 <sup>-10</sup> (4,7°C)<br>0,37*10 <sup>-10</sup> (9,7°C)<br><b>1,56*10<sup>-10</sup> (25°C)</b><br>13,2*10 <sup>-10</sup> (50°C)<br>215*10 <sup>-10</sup> (100°C) | 2             |                 |
| Silberchromat             | Ag <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>  | 1,20*10 <sup>-12</sup> (14,8°C)<br>9,00*10 <sup>-12</sup> (25°C)                                                                                                          | 3             |                 |
| Silberiodid               | AgI                               | 0,32*10 <sup>-16</sup> (13°C)<br>1,50*10 <sup>-16</sup> (25°C)                                                                                                            | 2             |                 |
| Silbersulfid              | Ag <sub>2</sub> S                 | 1,60*10 <sup>-49</sup> (18°C)                                                                                                                                             | 3             |                 |
| Silberthiocyanat          | AgSCN                             | 0,49*10 <sup>-12</sup> (18°C)<br>1,16*10 <sup>-12</sup> (25°C)                                                                                                            | 2             |                 |
| Strontiumcarbonat         | SrCO <sub>3</sub>                 | 1,60*10 <sup>-9</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 2             |                 |
| Strontiumfluorid          | SrF <sub>2</sub>                  | 2,80*10 <sup>-9</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 3             |                 |
| Strontiumoxalat           | SrC <sub>2</sub> O <sub>4</sub>   | 5,60*10 <sup>-8</sup> (18°C)                                                                                                                                              | 2             |                 |
| Strontiumsulfat           | SrSO <sub>4</sub>                 | 2,80*10 <sup>-7</sup> (2,9°C)<br>3,8*10 <sup>-7</sup> (17,4°C)                                                                                                            | 2             |                 |
| Thallium(I)-bromid        | TlBr                              | 3,90*10 <sup>-6</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 2             |                 |
| Thallium(I)-chlorid       | TlCl                              | 1,90*10 <sup>-4</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 2             |                 |
| Thallium(I)-iodid         | TlI                               | 5,80*10 <sup>-8</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 2             |                 |
| Thallium(III)-hydroxid    | Tl(OH) <sub>3</sub>               | 1,50*10 <sup>-53</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 4             |                 |
| Thallium(I)-sulfid        | Tl <sub>2</sub> S                 | 9,00*10 <sup>-23</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 3             |                 |
| Thallium(I)-thiocyanat    | TlSCN                             | 2,30*10 <sup>-4</sup> (25°C)                                                                                                                                              | 2             |                 |
| Zinkcarbonat              | ZnCO <sub>3</sub>                 | 6,00*10 <sup>-11</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 2             |                 |
| Zinkhydroxid              | Zn(OH) <sub>2</sub>               | 1,00*10 <sup>-17</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 3             |                 |
| alpha-Zinksulfid          | ZnS                               | 6,90*10 <sup>-26</sup> (20°C)                                                                                                                                             | 2             |                 |
| beta-Zinksulfid           | ZnS                               | 1,10*10 <sup>-24</sup> (25°C)                                                                                                                                             | 2             |                 |

Q: <https://wissen.science-and-fun.de/tabellen-zur-chemie/loslichkeitsprodukt/>

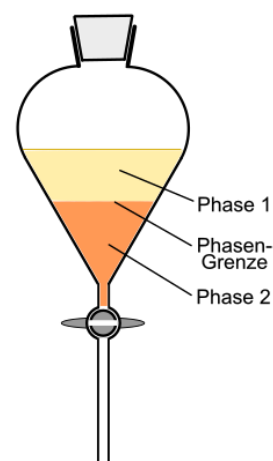
### 5.3.2.3.2. Verteilungs- oder Extraktions-Gleichgewichte



Viele Stoffe lösen sich in unterschiedlichsten Lösungsmitteln (LM). Dabei gibt es viele Stoffe, die sich sowohl in polaren wie auch in unpolaren Lösungsmitteln lösen. Häufig sind die Lösungsmittel selbst nicht ineinander lösbar. Für Verteilungs-Gleichgewichte ist dies eine wichtige Bedingung. Die Trennung der Phasen muss machbar sein.

Gibt man die verschiedenen Lösungsmittel zusammen, dann bilden sie zwei Phasen. Das Lösungsmittel mit der geringeren Dichte (das leichtere LM) setzt sich oben ab. Auch nach kräftigem Schütteln kommt es nach einiger Zeit wieder zur vollständigen Entmischen beider Phasen. In der Zwischenzeit wurde durch die Blasen-Bildung eine beachtliche Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen beiden Phasen erzielt. Über diese können gelöste Stoffe zwischen den Phasen ausgetauscht werden. Natürlich passiert dieser Austausch auch über eine ungemischte / unbewegte Phasen-Grenze, er dauert nur deutlich länger.

Als Geräte benutzt man üblicherweise einen sogenannten Scheide-Trichter. Das Gerät ist oben mit einem Stopfen oder Hahn verschließbar. Am unteren Ableitungs-Rohr befindet sich immer ein Hahn. Durch abgestimmtes Öffnen des Hahn's können einzelne Phasen sehr genau abgelassen werden. Die Phasen können so dann weiteren Untersuchungen zugeführt werden.



### Aufgaben:

1. *Bereiten Sie zum folgenden Experiment ein Protokoll (Aufgabe, Vorbeurteilung, Durchführung) vor und lassen Sie es von dem Durchführenden vom Kursleiter abzeichnen!*
2. *Führen Sie die Experimente durch und protokollieren Sie die Beobachtungen ausführlich!*
3. *Vervollständigen Sie Ihr Protokoll um Auswertung und Fehlerbetrachtung!*

### Verteilung von Iod in verschiedenen Lösungsmitteln

#### **Materialien / Geräte:**

5 Reagenzgläser (RG), Reagenzglas-Ständer mit Platz für mind. 5 RG's, passende Stopfen für die RG, Heptan, Wasser, Kaliumiodid (fest), Iod (fest), Maß-Pipetten (5 ml, mit Pump-Automatik)

#### **Hinweise:**

Maß-Pipetten sind auf Auslauf geeicht, d.h. die genau abgemessene Menge (Volumen) muss am freien RG-Innenbereich auslaufen können. Ein verbleibender Rest in der Pipetten-Spitze ist normal und ist bei der Eichung berücksichtigt worden!

Die Vergleichs-Reagenzgläser 1 und 5 können für die nachfolgenden Experimente weiterverwendet werden.

#### **Vorbereitung:**

- Herstellung einer 0,1 M-Lösung von Kaliumiodid in Wasser (→ Lsg. A) (für dieses Exp. rund 10 ml notw.; für das folgende Störungs-Experiment: 25 ml; für Temperatur-Exp.: 40 ml)
- Abtrennen von rund 2/3 der Lösung A und dazu ein Zusatz von 0,01 mol/l Iod (→ Lsg. B) (für dieses Exp. rund 25 ml notw.; für folgendes Störungs-Experiment: 20 ml; für Temperatur-Exp.: 15 ml)
- Herstellung einer Lösung von 0,01 mol/l Iod in Heptan (→ Lsg. C) (für dieses Exp. rund 25 ml notw.; für folgendes Störungs-Experiment: 30 ml; für Temperatur-Exp.: 30 ml)

**für alle Experimente werden gebraucht: zuerst 150 ml Kaliumiod-Lösung (→ Lsg. A), davon 70 ml für die Herstellung der Iod-Kaliumiodid-Lösung (→ Lsg. B); weiterhin rund 90 ml Iod-Heptan-Lösung (→ Lsg. C)**

#### **Durchführung / Ablauf:**

- Füllen des 1. RG mit 10 ml Iod-Kaliumiodid-Lösung (bleibt unverändert; für Vergleichszwecke)
- Füllen von 10 ml Iod-Heptan-Lösung in RG 5 (bleibt unverändert; für Vergleichszwecke)
- Füllen der RG's nach folgendem Schema:
  - RG 2: 5 ml Iod-Kaliumiodid-Lösung (Lsg. B) und 5 ml Iod-Heptan-Lösung (Lsg. C)
  - RG 3: 5 ml Iod-Kaliumiodid-Lösung (Lsg. B) und 5 ml Heptan
  - RG 4: 5 ml Iod-Heptan-Lösung und 5 ml Kaliumiodid-Lösung (Lsg. A)
- alle RG's zuerst vor dem Schütteln beobachten
- RG (2 - 4) mit Stopfen verschließen und aus dem Handgelenk seitlich kräftig schütteln (nicht gegen den Stopfen!) → beobachten
- RG's im RG-Ständer abstellen und 15 bis 20 min entmischen lassen → beobachten alle 5 – 10 min



## Störung des Verteilungs-Gleichgewichtes

### Vorbereitung:

- Herstellung der Lösungen A, B und C → siehe vorheriges Experiment

### Materialien / Geräte:

Lösungen A (Kaliumiodid-Lösung), B (Iod-Kaliumiodid-Lösung) und C (Iod-Heptan-Lösung); Reagenzgläser (RG); Reagenzglas-Ständer; Pipetten

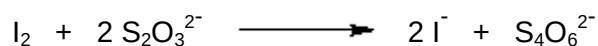
### Durchführung / Ablauf:

- falls möglich nutzen Sie die Vergleichs-RG's 1 und 5 aus dem vorherigen Experiment, sonst anlegen:
  - Füllen des 1. RG mit 10 ml Iod-Kaliumiodid-Lösung (bleibt unverändert; für Vergleichs-Zwecke)
  - Füllen von 10 ml Iod-Heptan-Lösung in RG 5 (bleibt unverändert; für Vergleichs-Zwecke)
- Füllen der RG's nach folgendem Schema:
  - RG 2: 5 ml Kaliumiodid-Lösung (Lsg. A) und 5 ml Iod-Heptan-Lösung (Lsg. C)
  - RG 3: 5 ml Kaliumiodid-Lösung (Lsg. A) und 5 ml Iod-Heptan-Lösung (Lsg. C)
  - RG 4: 5 ml Kaliumiodid-Lösung (Lsg. A) und 5 ml Iod-Heptan-Lösung (Lsg. C)
- alle RG's zuerst vor dem Schütteln beobachten
- RG (2 - 4) mit Stopfen verschließen und aus dem Handgelenk seitlich kräftig schütteln (nicht gegen den Stopfen!) → beobachten
- RG 3: nach dem Entmischen wird die wässrige Phase (alte Lsg. A) entfernt (*ev. für folgende Titration verwenden!*) und durch (neue) 5 ml Lösung A ersetzt und erneut gemischt
- RG 4: nach dem Entmischen wird die wässrige Phase (alte Lsg. A) entfernt (*ev. für folgende Titration verwenden!*) und durch 5 ml Lösung B ersetzt und erneut gemischt
- nach 5 min erneut beobachten
- *ev. für die Titration die neuen wässrigen Phasen aus RG 3 und 4 (- die, nach dem Austausch -) aufheben!*

## quantitative Erfassung von Iod / Titration mit Thiosulfat-Lösung

### Grundlagen / Prinzipien:

Für die quantitative Erfassung einer unbekannten Iod-Lösung wird die Titration mit einer definierten Thiosulfat-Lösung genutzt:



Vorhandenes Iod wird mit Stärke sichtbar gemacht. Iod und Stärke bilden eine blaue (bis schwarze) Einlagerungs-Verbindung. Das Iodid reagiert nicht mit Stärke und ist farblos. Am Äquivalenz-Punkt verschwindet die blaue Iod-Stärke-Farbe nach dem Verbrauch des letzten Iod's.

### Materialien / Geräte:

Proben z.B. aus vorherigem Experiment (reine Lösung A; reine Lösung B; wässrige Phase aus RG 3 nach erstem Mischen; wässrige Phase aus RG 3 nach zweitem Mischen; wässrige Phase aus RG 4 nach erstem Mischen; wässrige Phase aus RG 4 nach zweitem Mischen) definierte Thiosulfat-Lösung (0,01 mol/l ← g Natriumthiosulfat auf 1 l mit demineralisiertem Wasser auffüllen); Stärke-Lösung; verd. Salzsäure (Chlorwasserstoffsäure); Bürette; kleine Bechergläser oder Erlenmeyer-Kolben für die Vorlage; demineralisiertes Wasser in Spritzflasche

### **Vorbereitung:**

- die einzelnen Ausgangs-Proben werden in zwei 2ml-Proben aufgeteilt, dadurch kann man die Titration zweimal durchführen (hinterher entweder nur die zweite Titration beachten oder Mittelwert bilden)

### **Durchführung / Ablauf:**

- die 2ml-Probe wird in ein Becherglas oder einen Erlenmeyer-Kolben überführt, mit einem Tropfen verdünnte Salzsäure und 2 Tropfen Stärke-Lösung versetzt
- WENN die Lösung blau (bis schwarz) gefärbt wurde DANN weiter SONST ist kein freies Iod vorhanden
- Titration bis zur Entfärbung

### **Berechnungen:**

Stoffmenge  $n[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}] = 2 n [\text{I}_2]$        $c \cdot V [\text{Thiosulfat-Lsg.}] = c \cdot V [\text{Iod(-Lsg.) bzw. Probe}]$

$$c [\text{Iod}] = \frac{c \cdot V [\text{Thiosulfat-Lsg.}]}{V [\text{Iod-Lsg.}]}$$

## **Temperatur-Abhängigkeit eines Verteilungs-Gleichgewichtes**

### **Vorbereitung:**

- Herstellung der Lösungen → siehe erstes Experiment

### **Materialien / Geräte:**

Wasserbad (warm, 40 °C); Wasserbad (kalt, 0 °C); 5 Reagenzgläser (RG); Reagenzglas-Ständer

### **Durchführung / Ablauf:**

- falls möglich nutzen Sie die Vergleichs-RG's 1 und 5 aus dem ersten Experiment, sonst anlegen:
  - Füllen des 1. RG mit 10 ml Iod-Kaliumiodid-Lösung (bleibt unverändert; für Vergleichs-Zwecke)
  - Füllen von 10 ml Iod-Heptan-Lösung in RG 5 (bleibt unverändert; für Vergleichs-Zwecke)
- Füllen der RG's nach folgendem Schema:
  - RG 2: 5 ml Kaliumiodid-Lösung (Lsg. A) und 5 ml Iod-Heptan-Lösung (Lsg. C)
  - RG 3: 5 ml Kaliumiodid-Lösung (Lsg. A) und 5 ml Iod-Heptan-Lösung (Lsg. C)
  - RG 4: 5 ml Kaliumiodid-Lösung (Lsg. A) und 5 ml Iod-Heptan-Lösung (Lsg. C)
- alle RG's zuerst vor dem Schütteln beobachten
- RG (2 - 4) mit Stopfen verschließen und aus dem Handgelenk seitlich leicht schütteln (nicht gegen den Stopfen!) → beobachten
- RG 3 ins warme Wasserbad, RG 4 ins kalte Wasserbad (RG's können zwischenzeitlich kurz entnommen und leicht geschüttelt werden)
- alle 5 min beobachten (insgesamt 10 min)

### **Auswertung:**

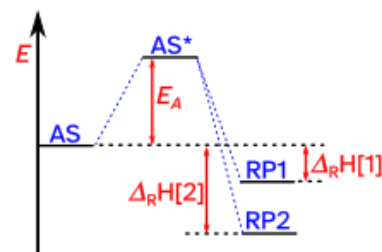
Geben Sie auch an, ob es sich bei dem Übergang von Iod aus der Iod-Kaliumiodid-Lösung (Lsg. B) in die Iod-Heptan-Lösung um einen exothermen oder endothermen Vorgang handelt!

## 5.4. Thermodynamik und Kinetik – wer bestimmt die Reaktion?

Passen die Erkenntnisse aus der Thermodynamik zu denen aus der Kinetik? Ist eine Reaktion, die stark exergon ist, auch automatisch sehr schnell?

Leider ist dies nicht zwangsläufig so. Man kann jedenfalls keine solche allgemeingültige Korrelation zwischen thermodynamischen und kinetischen Aussagen beobachten. Mit anderen Worten, man muss für jede Reaktion einzeln prüfen, welche Kennwerte sie hat. Aus deren Kenntnis heraus lässt sich dann entscheiden, welche Beeinflussungs-Möglichkeiten bestehen.

Besonders interessant wird die Betrachtung von thermodynamischen und kinetischen Aspekten, wenn man es mit Parallel-Reaktionen zu tun hat.



Oft ist nur eines der Produkte gewünscht. In unserem Beispiel soll besonders RP1 gewünscht sein.

Thermodynamisch können wir aus den Bildungs-Enthalpien, den Entropien und der Temperatur sehr schnell die freie Enthalpie (GIBBS-Enthalpie) bestimmen und sagen, welches Produkt thermodynamisch bevorzugt(er) ist.

$$\Delta_R H[1] = \Delta_B H[\text{RP1}] - \Delta_B H[\text{AS}]$$

$$\Delta_R H[2] = \Delta_B H[\text{RP2}] - \Delta_B H[\text{AS}]$$

$$\Delta_R S[1] = S^\circ[\text{RP1}] - S^\circ[\text{AS}]$$

$$\Delta_R S[2] = S^\circ[\text{RP2}] - S^\circ[\text{AS}]$$

$$\Delta_R G[1] = \Delta_R H[1] - T \cdot \Delta_R S[1]$$

$$\Delta_R G[2] = \Delta_R H[2] - T \cdot \Delta_R S[2]$$

Wenn wir unendlich lange warten (können), dann wird sich ein Gleichgewicht zwischen den beiden Reaktions-Produkten einstellen, welches dem Verhältnis der Reaktions-Enthalpien zueinander entspricht.

Da angenommen  $\Delta_R H[2]$  – also die Reaktions-Enthalpie der RP2-bildenden Reaktion geringer ist als  $\Delta_R H[1]$ , würde unter Standard-Bedingungen RP2 bevorteilt sein.

Wahrscheinlich gibt es für jede Parallel-Reaktion eine andere Grenz-Temperaturen für das Umschlagen der endergonen Reaktion in eine exergone (→ [Berechnung der Grenz-Temperatur / Umschlags-Temperatur](#)).

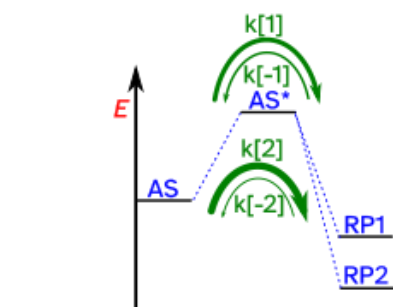
$$T[1] = \frac{\Delta_R H[1]}{\Delta_R S[1]}$$

$$T[2] = \frac{\Delta_R H[2]}{\Delta_R S[2]}$$

Die Bestimmung der Geschwindigkeits-Konstanten ist dann schon etwas aufwendiger.

Aus den thermodynamischen Daten würden wir wohl die nebenstehenden Geschwindigkeits-Konstanten erwarten. Die Reaktion zu RP2 müsste die größte Geschwindigkeit ( $k[2]$ ) haben und die Rück-Reaktion ( $k[-2]$ ) die kleinste.

Das gilt aber nur, wenn die Parallel-Reaktionen wirklich vergleichbar sind.



thermodynamisch zu erwartende Geschwindigkeits-Konstanten

Meisten spielen aber unterschiedliche Reaktions-Punkte in einem Molekül, die mal besser oder schlechter zugänglich sind, eine Rolle. Oder bestimmte Umbildungen im Molekül laufen mehrschrittig und damit wahrscheinlich langsamer ab. Bei solchen nicht direkt vergleichbaren Reaktionen dominieren dann die sogenannten sterischen oder kinetischen Aspekte eine entscheidende Rolle.

Praktisch können völlig andere – aus den thermodynamischen Daten überhaupt nicht vorhersehbare – Reaktions-Geschwindigkeiten auftreten.

Die wirksamen Konstanten müssen durch Labor-Versuche ermittelt werden.

Ausgehend von der Reaktions-Geschwindigkeit für den Umsatz vom Ausgangsstoff (für beide Parallel-Reaktionen):

$$-\frac{dc[AS]}{dt} = k \cdot c[AS]$$

können wir die Gesamt-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante  $k$  auf die beiden Parallel-Reaktionen ( $k = k_1 + k_2$ ) verteilen:

$$-\frac{dc[AS]}{dt} = (k_1 + k_2) \cdot c[AS] \quad \text{oder} \quad -\frac{dc[AS]}{dt} = k_1 \cdot c[AS] + k_2 \cdot c[AS]$$

Für die Betrachtung aus der Sicht der Reaktions-Produkte ergibt sich:

$$\frac{dc[RP1]}{dt} = k_1 \cdot c[AS] \quad \text{und} \quad \frac{dc[RP2]}{dt} = k_2 \cdot c[AS]$$

Die Berechnung der Konzentrationen kann dann über die integrierten Reaktionsgeschwindigkeits-Gesetze (Zeit-Gesetze) erfolgen:

$$c[AS] = {}_0c[AS] \cdot e^{-(k_1+k_2) \cdot t} \quad \text{sowie} \quad c[RP1] = \frac{k_1 \cdot {}_0c[AS]}{k_1 + k_2} (1 - e^{-(k_1+k_2) \cdot t})$$

$$\text{und} \quad c[RP2] = \frac{k_2 \cdot {}_0c[AS]}{k_1 + k_2} (1 - e^{-(k_1+k_2) \cdot t})$$

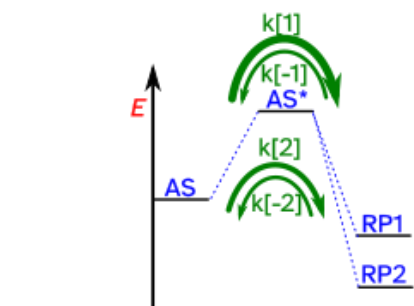
Man spricht von einer thermodynamischen Kontrolle, wenn das Ergebnis eines Vorgangs durch die Thermodynamik bestimmt wird. Eine Reaktion gilt als thermodynamisch kontrolliert, wenn sie sich im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Als Bedingungen für eine thermodynamische Kontrolle muss man also eine umkehrbare Reaktion und eine ausreichende Einstell-Zeit voraussetzen. Hohe Temperaturen führen ebenfalls zu einer thermodynamischen Kontrolle.

Unter thermodynamischer Kontrolle entsteht bevorzugt das stabilste Produkt, also das mit der geringsten freien Enthalpie.

Eine kinetische Kontrolle liegt dann vor, wenn kinetische Effekte / Gesetze den Reaktions-Verlauf bestimmen. Dies sind häufig sterische Hemmungen oder hohe Reaktions-Ordnungen. Diese verzögern die Einstellung des chemischen Gleichgewicht's meist deutlich. Kinetische Kontrolle ist immer mit Mangel an Energie (niedriges Energie-Niveau des System's) verbunden. Jetzt ist der Reaktions-Weg bevorzugt, der mit der geringsten Aktivierungs-Energie verbunden ist.

Weitere Charakteristika sind kurze Reaktions-Zeiten und einbezogene Katalysatoren.

Wird bei einer Parallel-Reaktion trotz der kleineren Reaktions-Geschwindigkeit das thermodynamisch stabilere Produkt bevorzugt, dann nennt man dies thermodynamische Kontrolle des Reaktions-System's.



Beispiel für z.B. kinetisch bedingte Geschwindigkeits-Konstanten

Wird bei einer Parallel-Reaktion das thermodynamisch ungünstigere Produkt gebildet, dann spricht man von einer kinetischen Kontrolle des Reaktions-System's.

Trotzdem gibt es diverse Zusammenhänge zwischen thermodynamischen und kinetischen Werten.

### VANT HOFFSche Gleichung

ermöglicht es eine Gleichgewichts-Konstante (für eine bestimmte Temperatur) auf eine andere Temperatur umzurechnen  
lässt auch die graphische Ermittlung der Reaktions-Enthalpie zu

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = - \frac{\Delta_R H}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

$K_1$  ... Gleichgewichts-Konstante bei  $T_1$

$K_2$  ... Gleichgewichts-Konstante bei  $T_2$

$T_1$  ... Temperatur 1 [K]

$T_2$  ... Temperatur 2 [K]

$R$  ... universelle Gas-Konstante (= 8,314 J/mol K)

### ULICHsche Näherung

zur Berechnung der Gleichgewichts-Konstanten

$$K_2 = K_1 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta_R H^0}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right)$$

$$\Delta_R H = R \cdot - \frac{\Delta \ln k}{\Delta \frac{1}{T}}$$

Zusammenhang zwischen der Gleichgewichts-Konstanten und der freien Enthalpie (Reaktions-Antrieb)

$$\ln K_c = - \frac{\Delta_R G^0}{R \cdot T}$$

andere Formulierungen (mit dekadischen Logarithmus):

$$\lg K_2 = \lg K_1 + \frac{\Delta_R H^0}{2,3 \cdot R} \cdot \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

kombiniert mit der GIBBS-HELMHOLTZ-Gleichung

$$\lg K = \frac{1}{2,3 \cdot R} \cdot \left( \Delta_R S^0 - \frac{\Delta_R H^0}{T} \right)$$

$$\Delta_R G^0 = \Delta_R H^0 - T \cdot \Delta_R S^0$$

ergibt:

$$\ln K_c = - \frac{\Delta_R H^0}{R} \cdot \frac{1}{T} + \frac{\Delta_R S^0}{R}$$

$$y = m \cdot x + n$$

Dabei wurde gleich eine Schreibweise genutzt, die den linearen Zusammenhang zwischen dem natürlichen Logarithmus der Gleichgewichts-Konstanten und dem Reziproken der Temperatur deutlich macht. Die Gleichung zur Berechnung des natürlichen Logarithmus des für die Gleichgewichts-Konstante wird auch 1. ULICHsche Näherung genannt.

Bei der 2. ULICHschen Näherung wird noch das KIRCHHOFFSche Gesetz:

$$\Delta_R H[T_2] = \Delta_R H[T_1] + \Delta_R C_p \cdot (T_2 - T_1)$$

mit einbezogen. Es ergibt sich dann:

$$\ln K_2 = - \frac{\Delta_R H^0}{R \cdot T} + \frac{\Delta_R S^0}{R} + \frac{\Delta C_p^0}{R} \cdot \left( \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{T_1}{T_2} - 1 \right) \quad \text{mit} \quad \Delta C_p^0 = \sum_i (v[i] \cdot C_p[i])$$

bzw.:  $\Delta C_p = C_p[\text{Produkte}] - C_p[\text{Edukte}]$

der Summe der mit den stöchiometrischen Faktoren multiplizierten Wärmekapazitäten der reagierenden Stoffe.

In der 3. ULICHschen Näherung wird dann noch die Temperatur-Abhängigkeit der Wärmekapazitäten beachtet.

Der negative Anstieg der Geraden (entspricht **-m**) beschreibt den Quotienten aus Reaktions-Enthalpie und der universellen Gas-Konstanten. Aus diesem Quotienten ist dann die Reaktions-Enthalpie leicht berechenbar (siehe auch oben):

$$\Delta_R H = R \cdot - \frac{\Delta \ln k}{\Delta \frac{1}{T}}$$

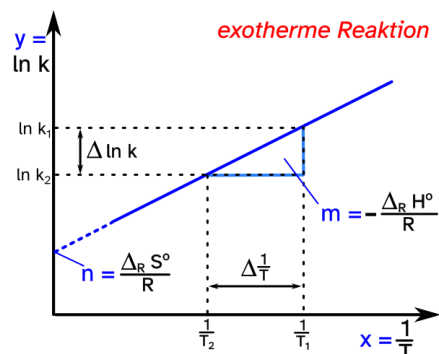
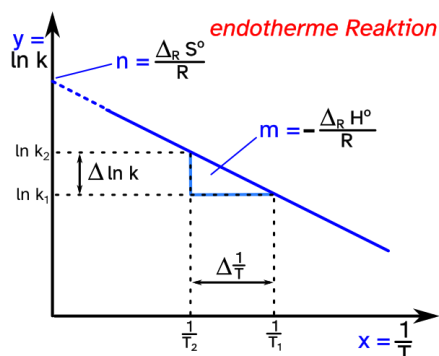
Der Schnittpunkt mit der Abszisse (entspricht n) würde den Quotienten aus Reaktions-Entropie und universeller Gas-Konstanten darstellen. Der Wert ist graphisch aber nicht exakt zugänglich, weil die reziproke Ordinate hier keinen echten 0-Wert bietet. Eine recht genaue Interpolation ist aber möglich.

### VAN'T HOFFSche Reaktions-Isobare

für eine exotherme Reaktion ergibt sich ein positiver Anstieg der Geraden (Reaktions-Isobaren)

gilt für Reaktionen, die unter konstantem Druck (also isobar) ablaufen.

**VAN'T HOFFSche Reaktions-Isochore** für Reaktionen die bei konstantem Volumen ablaufen



Zusammenhang zwischen der molaren freien Standard-Enthalpie und der Gleichgewichts-Konstanten (aus dem MWG)

$$\Delta_R G^0 = -R \cdot T \cdot \ln K$$

$\Delta_R G^0$  ... molare freie Standard-Enthalpie

K ... Gleichgewichts-Konstante

R ... universelle Gas-Konstante (= 8,314 J/mol K)

WEGSCHEIDERSches Prinzip (Prinzip von WEGSCHEIDER)

besagt, dass bei Parallel-Reaktionen der schnellste Schritt Geschwindigkeits-bestimmend ist  
die Selektivität einer Reaktion ist unabhängig von der Reaktions-Zeit  
ist die Basis für die kinetische Kontrolle einer Reaktion

Für die thermodynamische Kontrolle bestimmt das Massen-Wirkungs-Gesetz (MWG) das Geschehen.

Als Analogie kann man die Parallel-Schaltung von Widerständen nutzen. In einem solchen Strom-Kreislauf bestimmt der kleinste Widerstand den Gesamt-Widerstand.

Die Analogie für eine Folge-Reaktion wäre dementsprechend die Reihen-Schaltung von Widerständen. In der Reihen-Schaltung bestimmt der größte Widerstand den Gesamt-Widerstand. Auf die Folge-Reaktion betrachtet heißt dies, dass die langsamste Reaktion die Gesamt-Geschwindigkeit bestimmt.

### Video's:

<https://www.youtube.com/watch?v=3DnITWfwsf0> (SciFox)

<https://av.tib.eu/media/15667> (SciFox)

<https://av.tib.eu/media/15626> (SciFox)

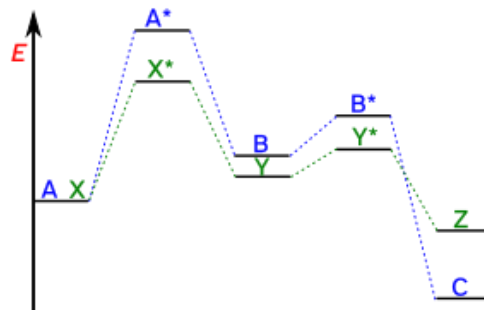
### Aufgaben:

- Überlegen Sie sich, mit welchen Veränderungen zu den obigen Betrachtungen gerechnet werden muss, wenn die Reaktion zu RP2 irreversibel (also ohne Rück-Reaktion) abläuft! Geben Sie passende Thesen und Formeln an und erläutern Sie diese!
- Geben Sie die Formeln für die Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeiten und der momentanen Konzentration für ein Reaktions-System mit drei parallelen Reaktionen an!

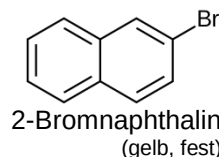
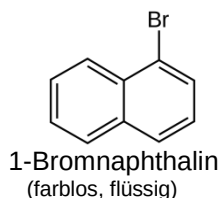
- Gegeben sind die Folge-Reaktionen:



Es gilt weiterhin das nebenstehende Energieniveau-Diagramm. Hier sind A und X für Vergleichs-Zwecke auf das gleiche Niveau gestellt worden. (Bei A und X könnte auch der gleiche Stoff gemeint sein.)



- Machen Sie Aussagen zu den erwarteten Stoffmengen nach ausreichend langer Zeit!
  - Welche Aussagen können Sie über die Stoffmengen z.B. nach 10 s (deutlich vor der Zeit aus der Teilaufgabe a)) machen? Begründen Sie Ihre Aussagen!
- Naphthalin kann in einer Substitutions-Reaktion mit Brom ( $S_E$ -Mechanismus) zu Monobromnaphthalin umgewandelt werden. Dabei entstehen zwei Produkte, das 1-Bromnaphthalin und das 2-Bromnaphthalin.



Die Reaktions-Enthalpie für die Bildung von 1-Bromnaphthalin ist deutlich negativer als die zu 2-Bromnaphthalin.

Läuft die Reaktion bei niedrigen Temperaturen, dann ist nur eine geringe Bildung von 1-Bromnaphthalin zu beobachten.

- Erklären Sie dieses Phänomen!
- Bei hohen Temperaturen bildet sich bevorzugt 1-Bromnaphthalin. Erklären Sie dieses Phänomen!
- Handelt es sich um eine thermodynamische oder kinetische Kontrolle / Steuerung? Begründen Sie!

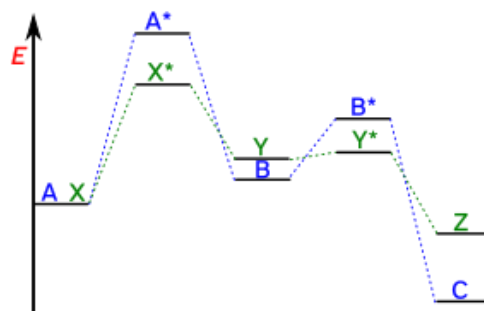
### für das gehobene Anspruchsniveau:

- Gegeben sind die Folge-Reaktionen:



(Reaktionen haben nichts mit denen in Aufgabe 3 zu tun!)

Es gilt weiterhin das nebenstehende Energieniveau-Diagramm. Hier sind A und X für Vergleichs-Zwecke auf das



---

*gleiche Niveau gestellt worden. (Bei A und X könnte auch der gleiche Stoff gemeint sein.)!*

*a) Machen Sie Aussagen zu den erwarteten Stoffmengen nach ausreichend langer Zeit!*

*b) Es sei nun A und X der gleiche Stoff und es sind die folgenden Beziehungen der Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bekannt:*



*Machen Sie Aussagen zur erwarteten Ausbeute der Stoffe C und Z im Verhältnis zueinander! Begründen Sie!*

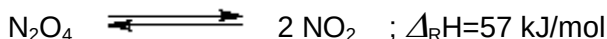


---

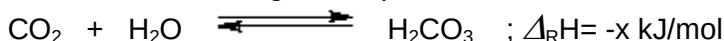
**komplexe und Wiederholungs-Aufgaben (ev. zur Vorbereitung auf eine Klausur):**

**1. Die nachfolgenden chemischen Gleichgewichte sollen so geführt werden, dass möglichst viele Reaktions-Produkte gebildet werden. Geben Sie an, mit welchen Faktoren und wie genau (z.B.: zunehmend oder abnehmend; kleiner oder größer) Sie das chemische Gleichgewicht beeinflussen wollen! Begründen Sie Ihre Wahl!**

a) Umwandlung von Distickstofftetraoxid in Stickstoffdioxid



b) Kohlensäure-Gleichgewicht (z.B. in Getränke-Flaschen)



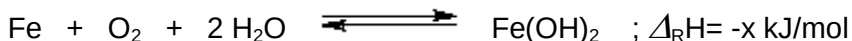
c) vollständige Verbrennung von Methan zu Kohlendioxid und Wasser (gasförmig)

d) Brennen von Kalk:  $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$  ;  $\Delta_R H = 179 \text{ kJ/mol}$

e) Herstellung von Schwefeltrioxid aus Schwefeldioxid ( $\Delta_R H = -197 \text{ kJ/mol}$ )

**2. Die nachfolgenden chemischen Gleichgewichte sollen so geführt werden, dass die Ausgangsstoffe sich nicht umsetzen (Verhinderung eines Verderbs, ...). Geben Sie an, mit welchen Faktoren und wie genau (z.B.: zunehmend oder abnehmend; kleiner oder größer) Sie das chemische Gleichgewicht beeinflussen wollen! Begründen Sie Ihre Wahl!**

a) Korrosion von Eisen (Rosten)



d) Zerlegung (Hydrolyse) eines (Nahrungs-)Fettes in Glycerol und (unangenehm riechende) Fettsäuren



c) Umwandlung von Glycerol in giftiges Acrolein (beizender Fritten-Geruch (McDonalds-Geruch))



d)

**3. Durch welche Veränderungen in den Reaktions-Bedingungen können die nachfolgenden chemischen Gleichgewichte beeinflusst werden? Für welche Bedingungs-Veränderungen sind sie nicht empfindlich? Geben Sie immer eine kurze Begründung an!**

a)  $\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2 \text{CO}$  ;  $\Delta_R H = +x \text{ kJ/mol}$

b)  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$  ;  $\Delta_R H = +x \text{ kJ/mol}$

c)  $\text{CO} + \text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{NO}$  ;  $\Delta_R H = +x \text{ kJ/mol}$

d)  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$  ;  $\Delta_R H = +x \text{ kJ/mol}$

e)  $2 \text{NO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{NO}_2$  ;  $\Delta_R H = +x \text{ kJ/mol}$

f)  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3 \text{H}_2$  ;  $\Delta_R H = +x \text{ kJ/mol}$

g)  $2 \text{CH}_4 + \text{O}_2 + 4 \text{N}_2 \rightleftharpoons 2 \text{CO} + 4 \text{H}_2 + 4 \text{N}_2$  ;  $\Delta_R H = +x \text{ kJ/mol}$

h)  $\text{CO}_2 + \text{NO} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{NO}_2$  ;  $\Delta_R H = +x \text{ kJ/mol}$

**4. Erstellen Sie ein ConceptMap zum Thema "Abhängigkeit der Reaktions-Geschwindigkeit"!**

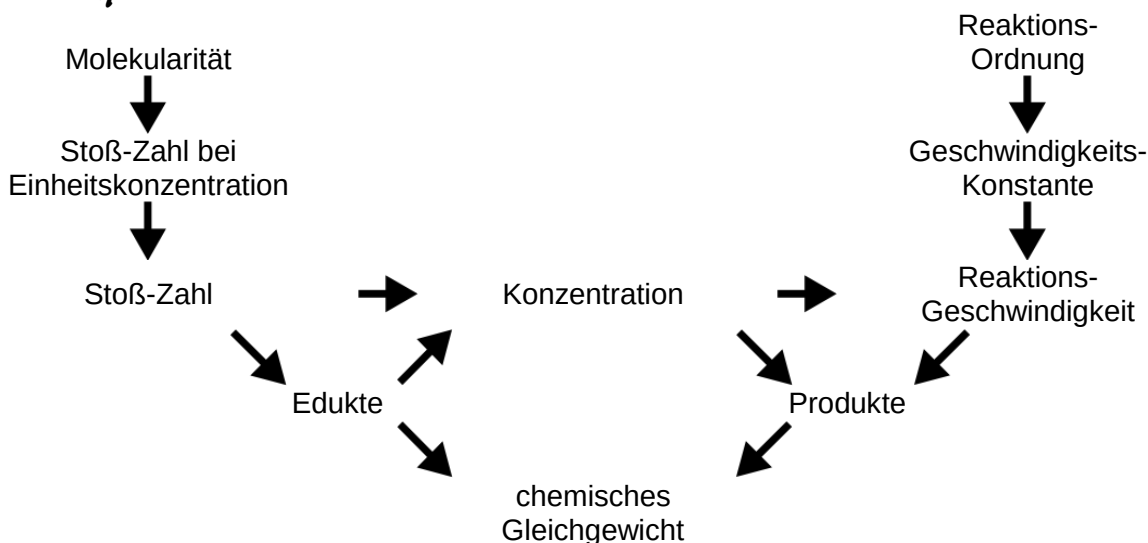
5. Der Pfiffikus der Klasse behauptet, dass man mit der Stoß-Theorie sowohl die Temperatur- als auch die Konzentrations-Abhängigkeit einer chemischen Reaktion erklären kann. Stimmt das? Erklären Sie!
6. Salpetersäure ist eine wichtige Grundchemikalie. Für ihre Herstellung wird u.a. auf die Gleichgewichts-Reaktion von Ammoniak mit Sauerstoff zu Stickstoffmonoxid und Wasser zurückgegriffen. Das Stickstoffmonoxid wird in einer weiteren Reaktion zu Stickstoffdioxid oxidiert. Statt reinem Sauerstoff setzt man bei beiden Reaktionen vorgereinigte Luft ein. In ihr sind nur noch Sauerstoff und Stickstoff enthalten.
- Geben Sie die Formel für Salpetersäure sowie die Dissoziation in Wasser an!
  - Stellen Sie die Reaktionsgleichung für die Ammoniak-Oxidation an!
  - Ermitteln Sie, ob diese Reaktion bei Standard-Bedingungen freiwillig abläuft!
  - Geben Sie an, durch welche geänderte Bedingungen die Ausbeute an Stickstoffmonoxid erhöht werden kann!
  - Formulieren Sie das Massenwirkungs-Gesetz für die Stickstoffmonoxid-Bildung aus Ammoniak!
  - Für einen Reaktor liegen die folgenden Messwerte vor:  
Berechnen Sie die Gleichgewichts-Konstanten!
  - Zur Verbesserung der Ausbeute wird ein Platin-Katalysator eingesetzt. Welche Funktionen übernimmt ein Katalysator bei einer Reaktion? Schätzen Sie auch ein, ob der Einsatz des Platin's die Produktion nicht auf Dauer zu teuer macht! Erläutern Sie Ihre Position!
  - Geben Sie mindestens drei Verwendungs-Zwecke für Salpetersäure an! Stellen Sie für eine die Reaktions-Gleichung auf und bestimmen Sie den Reaktions-Typ!
7. Kristallviolett ist ein Wasser-löslicher Farbstoff, dessen Lösung blau-violett gefärbt ist. Nach Zusatz von Natronlauge kommt es zur langsamen Entfärbung. Über Licht-Absorptions-Messungen wurden die Farbstoff-Konzentrationen zu verschiedenen Zeitpunkten erfasst.

| Zeit t [s]              | 0                   | 20                  | 40                   | 60                  | 80                   | 100                  | 120                  |
|-------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Konzentration c [mol/l] | $0,7 \cdot 10^{-5}$ | $0,5 \cdot 10^{-5}$ | $0,38 \cdot 10^{-5}$ | $0,3 \cdot 10^{-5}$ | $0,22 \cdot 10^{-5}$ | $0,18 \cdot 10^{-5}$ | $0,16 \cdot 10^{-5}$ |

- Stellen Sie die Messwerte graphisch dar! Interpretieren Sie den Graph!
- Bestimmen Sie die durchschnittliche Reaktions-Geschwindigkeiten für die Zeit-Abschnitte von 0 bis 20, von 40 bis 60 und von 100 bis 120 Sekunden! Interpretieren Sie die berechneten Werte!
- Mit der Methode der Anfangs-Geschwindigkeit ermittelt man eine Konstante, mit der man näherungsweise die Reaktions-Geschwindigkeit für jede beliebige Konzentration berechnen kann. Erläutern Sie, wovon man bei der Methode ausgeht und wie man die Konstante berechnet!

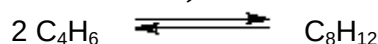
8. Die Reaktions-Geschwindigkeit ist von mehreren Faktoren abhängig. Geben Sie mindesten drei mögliche Faktoren an und erläutern Sie jeweils kurz, wie die Beeinflussung erfolgt und welche Veränderungen sich für den Reaktions-Verlauf dabei ergeben!

9. Für die Kinetik chemischer Reaktionen lässt sich z.B. die folgende Begriffs-Karte aufstellen:



Q: /25, S. 82/; leicht geändert: dre

a) Für die Reaktion 1,3-Butadien zu 1,7-Octadien:

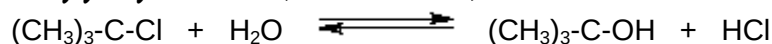


hat man festgestellt, dass sie dem Geschwindigkeits-Gesetz:

$$\text{RG} = k \cdot c [\text{C}_4\text{H}_6]^2$$

folgt. Erläutern Sie die im Schema dargestellten Begrifflichkeiten und Zusammenhänge am Beispiel dieser Reaktion!

b) Die alkalische Hydrolyse von 2-Chlor-2-Methylpropan (tert-Butylchlorid) zu 2-Methylpropan-2-ol (tert-Butanol):

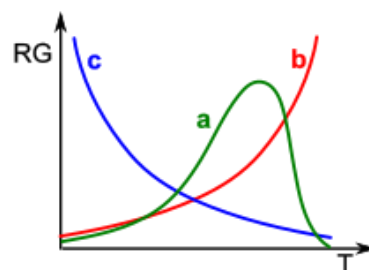


verläuft nach dem Geschwindigkeits-Gesetz 1. Ordnung.

Erläutern Sie die im Schema dargestellten Begrifflichkeiten und Zusammenhänge am Beispiel dieser Reaktion! Gehen Sie dabei auch auf den möglichen Reaktions-Mechanismus ein!

10. Im nebenstehenden Diagramm ist die Abhängigkeit der Reaktions-Geschwindigkeit (RG) von der Temperatur (T) für verschiedene chemische Systeme dargestellt.

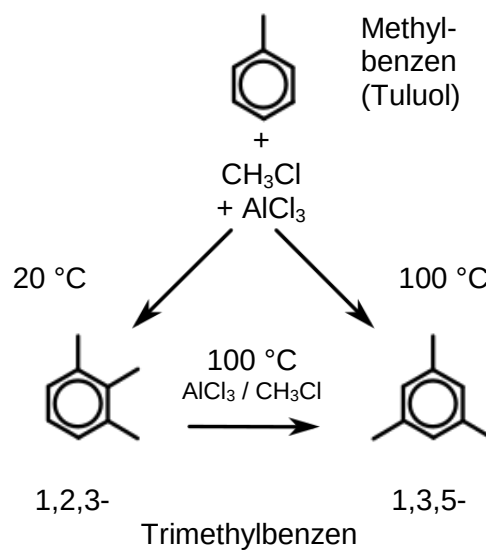
Überlegen Sie sich, welche Art chemisches System sich hinter a, b und c verbirgt! Begründen Sie Ihre Wahl!



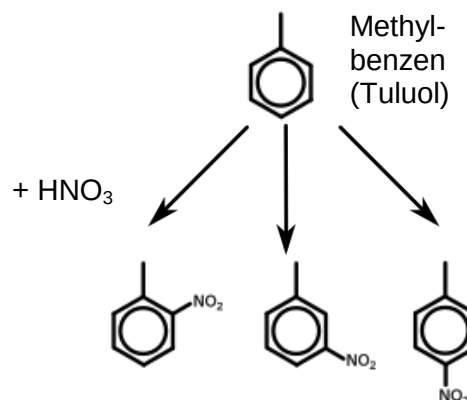
**11. Reaktionen lassen sich kinetisch und thermodynamisch kontrollieren.**

**12.**

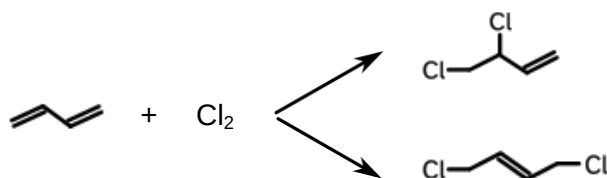
Alkylierung von Toluol



Nitrierung von Toluol



Addition am Butadien



## 5.5. chemisch-technische Verfahren

### 5.5.1. Ammoniak-Synthese

Chemisch verwertbarer Stickstoff war Anfang des 20. Jahrhunderts nur über biologische Materialien oder mineralische Salze verfügbar. In Zeiten eines immer größeren Dünger-Bedarfs in der Landwirtschaft schienen die Ressourcen an Salpeter schon endlich. Dazu kam ein enormer Bedarf von Stickstoff-Verbindungen für die Herstellung von Sprengstoffen. Deutschland und andere Länder befanden sich in einer Phase verstärkter Aufrüstung.

Der praktisch unendlich zur Verfügung stehende Stickstoff der Luft war praktisch nicht nutzbar.

1908 stellte Fritz HABER (1868 – 1934) ein Verfahren zur Herstellung von Ammoniak aus Luft-Stickstoff vor und meldete es zum Patent an. Die chemische Industrie steckte damals noch in ihren Kinderschuhen. Das größte Problem war es deshalb auch, mit den sehr großen Drücken klar zu kommen. Carl BOSCH () war ein Chemiker der BASF, der sich besonders mit den technischen Herausforderungen beschäftigt hat. Er entwickelte das revolutionäre Doppelrohr. Dieses bestand aus einem inneren Rohr aus weichem Eisen, das vom Wasserstoff kaum angegriffen wurde. Nach außen folgt dann zunächst eine Hülle aus hochfestem Edelstahl, die für die Druck-Stabilität sorgte. In ihr sammelt sich der Wasserstoff, der die Weich-Eisen-Schicht durchdringen konnte. Damit nur ein begrenzter Teil des Wasserstoff's in die Umgebung entweichen kann und zum anderen aber die Wasserstoff-Menge im Edelstahl nicht zu hoch wird, ist die Edelstahl-Hülle nochmals von einer Hülle aus gewöhnlichem Stahl umgeben. In diese sind Löcher eingelassen, die für eine begrenzte Ableitung des Wasserstoff's dienen.

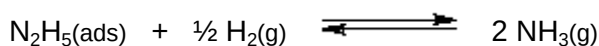
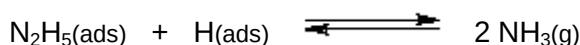
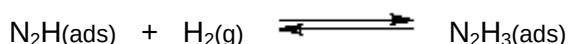
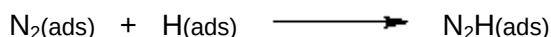
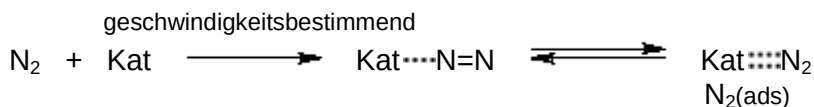
Für das Herstellungs-Verfahren von Ammoniak aus Luft-Stickstoff erhielt HABER den NOBEL-Preis für Chemie. Unrühmlich sind allerdings seine Leistungen bei der Entwicklung und Herstellung von Giftgasen für die Weltkriege.

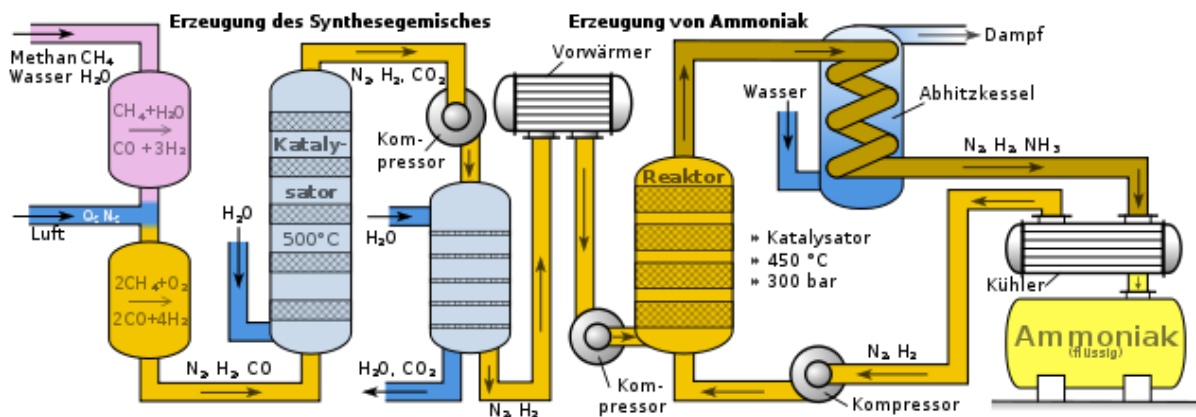
Auch BOSCH erhielt viele Jahre später einen NOBEL-Preis für seine Leistungen.

### HABER-BOSCH-Verfahren



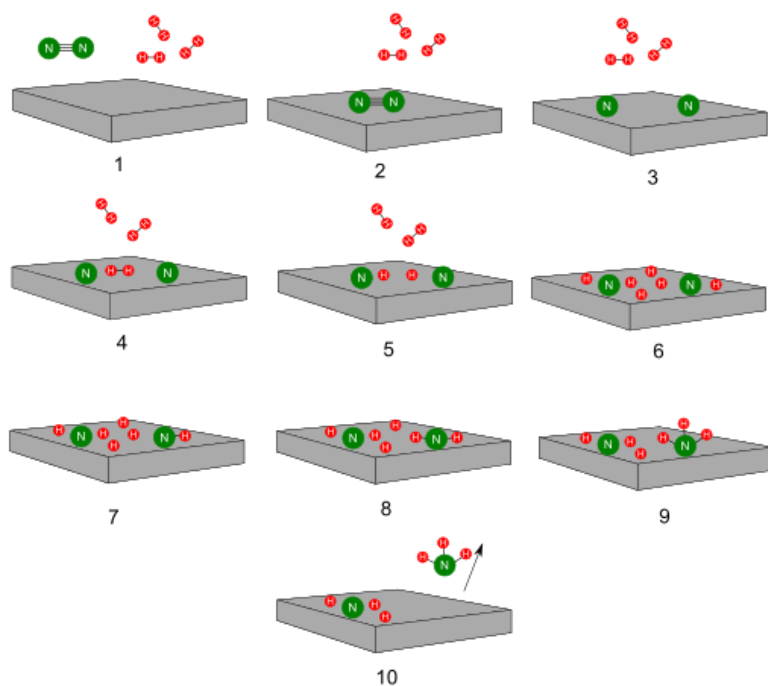
Katalysator Fe mit verschiedenen Anteilen  $K_2O$  u.  $Al_2O_3$





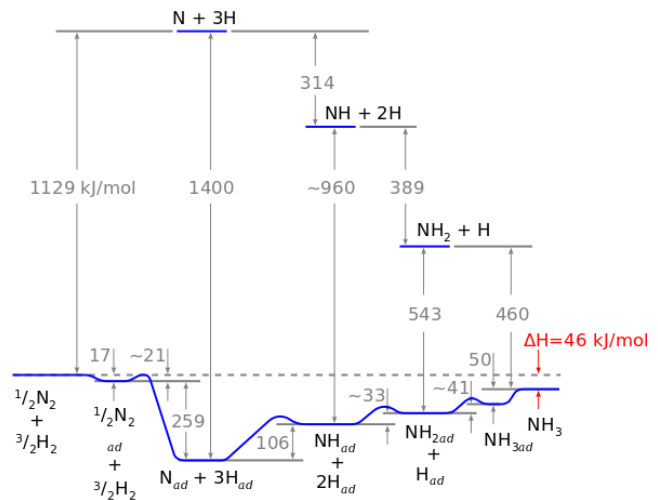
HABER-BOSCH-Verfahren  
Q: de.wikipedia.org (Sven)

der eigentliche Katalysator ( $\alpha$ -Eisen (Ferrit)) entsteht erst während der Reaktion das Stoffgemisch auf den Katalysatorböden besteht aus Eisen(II,III)-oxid, Kaliumoxid, Calciumoxid, Aluminiumoxid und Siliciumoxid



Vorgänge am Katalysator  
Q: de.wikipedia.org (Muskid)

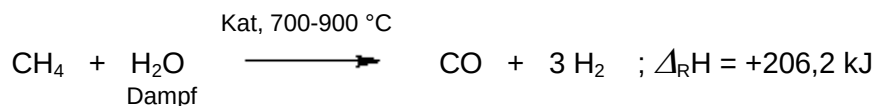
| T [K] | $\vartheta$ [°C] | $K_c$ []            |
|-------|------------------|---------------------|
| 300   |                  | $2,6 \cdot 10^8$    |
| 400   |                  | $3,9 \cdot 10^4$    |
| 500   |                  | $1,7 \cdot 10^2$    |
| 600   |                  | 4,2                 |
| 700   |                  | $2,9 \cdot 10^{-1}$ |
| 800   |                  | $3,9 \cdot 10^{-2}$ |
| 900   |                  | $8,1 \cdot 10^{-3}$ |
| 1000  |                  | $2,3 \cdot 10^{-3}$ |



Energieniveaus der Katalyse  
Q: de.wikipedia.org (???)

## Herstellung des Synthese-Gases

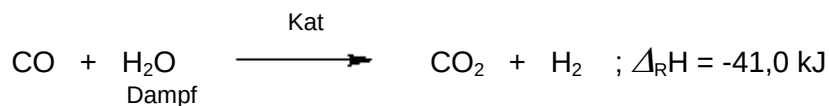
z.B. Dampf-Spaltung von Methan (z.B. aus Erdgas)



nicht umgesetztes Methan wird in einem zweiten Reformer partiell oxidiert:



Das reichlich gebildete Kohlenmonoxid kann in weiteren Synthesen, als Brenn-Gas oder mit Wasser-Dampf zu weiterem Wasserstoff umgewandelt werden:



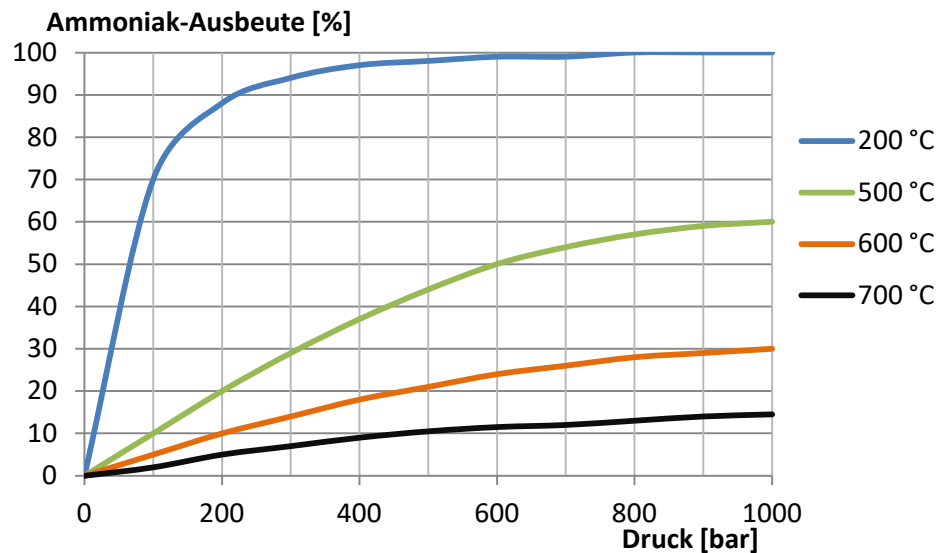
der Stickstoff wird aus der Luft gewonnen

der Sauerstoff kann z.B. über die oben beschriebene partielle Oxidation von Methan entzogen werden

auch die anderen Bestandteile werden weitestgehend entfernt, um eine Vergiftung des / der Katalysatoren vorzubeugen

### Aufgaben:

#### **1. Interpretieren Sie das Diagramm!**



2. Überlegen Sie sich, welche Reaktions-Bedingungen Sie ausgehend vom Diagramm wählen würden! Begründen Sie Ihre Wahl!
3. In der Praxis wird bei 450 °C gearbeitet. Skizzieren Sie sich ein Diagramm, dass neben den bekannten Temperatur-Kurven auch eine abgeschätzte für 450 °C enthält! Erklären Sie, warum Sie die Kurve so gelegt haben!
4. Erklären Sie, warum man in der Praxis bei 450 °C und 300 bar arbeitet!

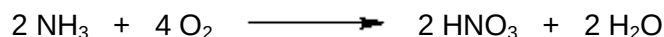


---

## 5.5.2. OSTWALD-Verfahren – Synthese von Salpetersäure

Oxidation von Ammoniak mittels Luft-Sauerstoff

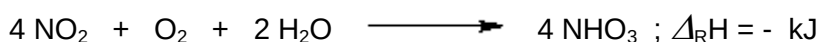
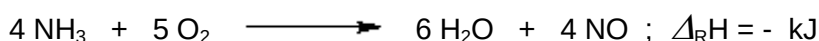
Gesamt-Gleichung:



Ausgangsstoffe: Ammoniak und Luft

Katalysator Platin(-Netz)

Arbeits-Temperatur 600 °C; durch Strom-Durchfluss durch das Platin-Netz wird die nötige Temperatur erreicht



Verwendung der Salpetersäure für die Düngemittel- und Sprengmittel-Produktion

OSTWALD erhielt 1909 den Chemie-NOBEL-Preis

### Aufgaben:

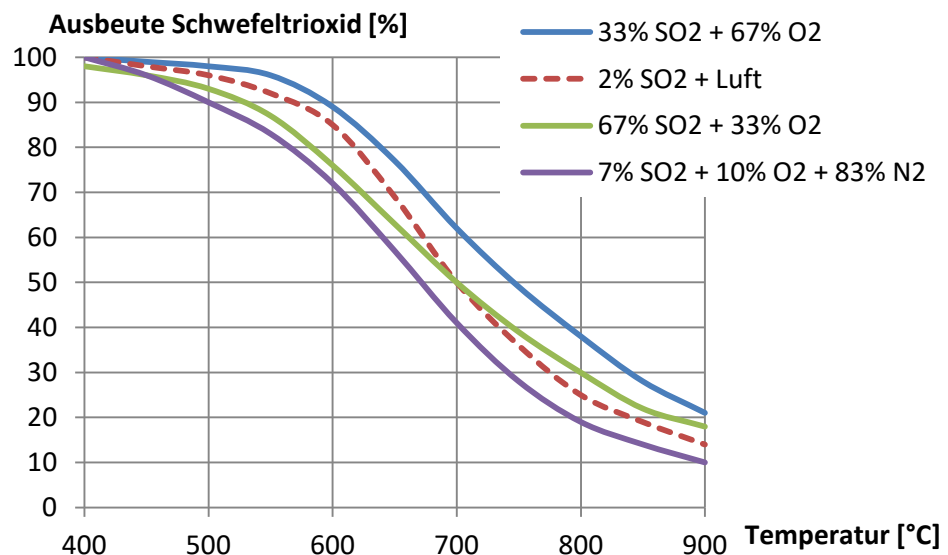
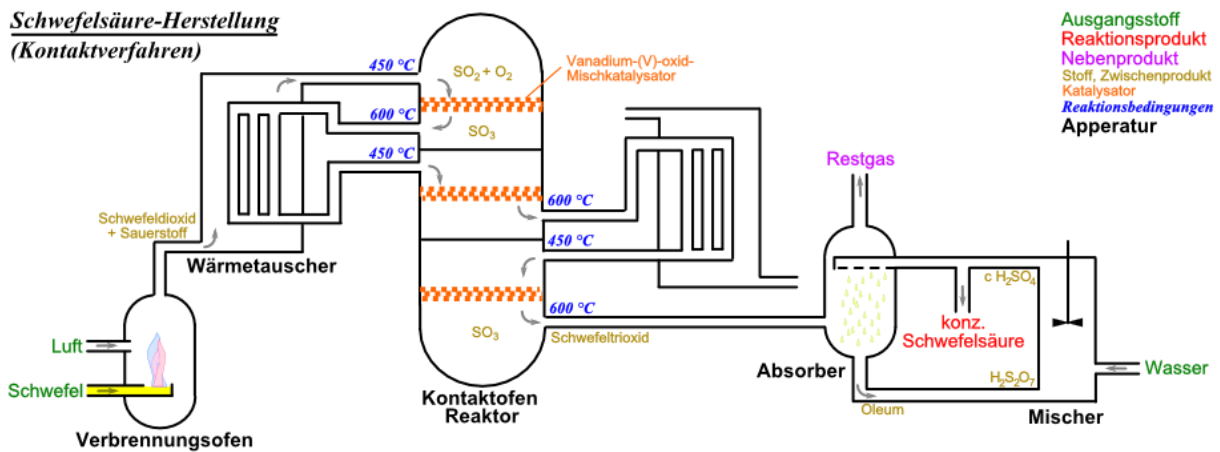
- 1.
- 2.
- 3.

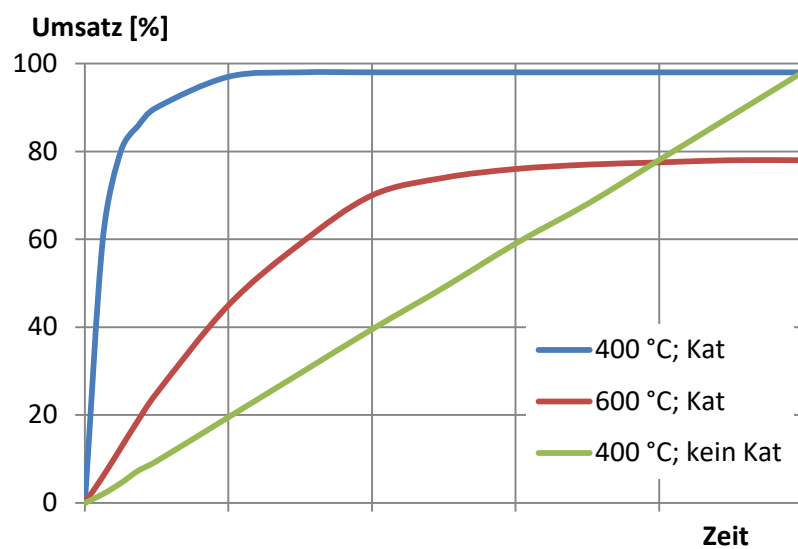
### für die gehobene Anspruchsebene:

4. **Konzentrierte Salpetersäure löst die unedlen Metalle Aluminium und Eisen nicht auf. Erklären Sie dieses Phänomen!**
5. **Auch Gold und Platin als edle Metalle werden von konzentrierter Salpetersäure wie auch von konzentrierter Salzsäure nicht angegriffen. Dagegen werden die edlen Metalle Silber, Kupfer und Quecksilber aufgelöst. Konzentrierte Salzsäure löst alle genannten Edel-Metalle nicht auf. Setzt man der Salpetersäure aber die dreifache Menge an konzentrierter Salzsäure zu, dann lösen sich auch die Metalle Gold und Platin auf. In dem Zusammenhang fallen auch die Begriffe Königs- und Scheidewasser. Erläutern Sie die Vorgänge und ordnen Sie die Begriffe ein!**

### 5.5.3. Kontakt-Verfahren – Synthese von Schwefelsäure

#### Schwefelsäure-Herstellung (Kontaktverfahren)





### **komplexe Aufgaben:**

1. Schwefeldioxid ist ein gasförmiger, stechend riechender und gut wasserlöslicher Stoff. Er entsteht bei der Verbrennung von Schwefel in Form eines hellen Rauches.
  - a) Stellen Sie die Gleichung für die Verbrennung von Schwefel an der Luft auf! Bestimmen Sie den Reaktions-Typ und begründen Sie Ihre Zuordnung!
  - b) Berechnen das Volumen und die Masse an Schwefeldioxid, die aus 14 g Schwefel gebildet werden!
  - c) Um den Gehalt an Schwefeldioxid in einem Luft-Volumen zu bestimmen, leitet man dieses durch Gas-Wäsche, die mit verdünnter Wasserstoffperoxid-Lösung gefüllt ist. Das Schwefeldioxid wird gelöst und reagiert dann zu Schwefelsäure weiter. Der Umsatz erfolgt vollständig. Stellen Sie passende Gleichungen auf und bestimmen Sie jeweils den Reaktions-Typ!
  - d) Die genaue Gehalts-Bestimmung erfolgt über eine Titration mit Natriumhydroxid-Lösung. In einer Labor-Untersuchung wurde ein Luft-Volumen von  $25 \text{ m}^3$  durch die Gaswäsche geleitet. Die Titration mit einer 1 M-Natriumhydroxid-Lösung benötigte dann 2,3 ml. Berechnen Sie die Massen-Konzentration in  $\text{g/m}^3$  an Schwefeldioxid in der Luft-Probe!
  - e) Bewerten Sie die Gas-Probe auf der Basis des gültigen MAK-Wertes von  $2,7 \text{ mg/m}^3$  (MAK ... Maximale Arbeitsplatz-Konzentration)!
2. Schwefeldioxid (z.B. aus Braunkohle-Kraftwerken) ist bzw. war eine der Hauptursachen für die Entstehung des sauren Regens.
  - a) Geben Sie die chemische Gleichung für die Bildung des sauren Regen's an! Bestimmen und begründen Sie den Reaktions-Typ!
  - b) Erklären Sie, warum die Bezeichnung "saurer Regen" zutrifft oder ob er falsch ist!
  - c) Berechnen Sie die Masse an Schwefeldioxid, die sich in  $1'000 \text{ m}^3$  Regenwasser gelöst haben müsste, damit diesen einen pH-Wert von 4 hat! Gehen Sie von einer vollständigen Protolyse aus!
  - d) Zur Neutralisation wird in Wäldern mit Magnesiumoxid gearbeitet. Berechnen Sie die Masse an Magnesiumoxid, die für die Anhebung des pH-Wertes auf 5,5 des sauren Regen's ( $1'000 \text{ m}^3$ ) benötigt wird!
  - e) Macht die Anhebung des pH-Wertes um die 1,5 Einheiten eigentlich wirklich Sinn? Erläutern Sie das aus wissenschaftlicher Sicht!
3. In einer Versuchs-Einrichtung zur Herstellung von Schwefeltrioxid aus Schwefeldioxid und Sauerstoff wird ein Labor-Reaktor mit  $70 \text{ l}$  Volumen benutzt. Nach einer gewissen Zeit bemerkt man, dass sich die Konzentration und Stoffmengen auf einem bestimmten Wert einpegeln. So ermittelt man für Schwefeltrioxid und Sauerstoff jeweils eine Stoffmenge von  $0,75 \text{ mol}$ , für Schwefeldioxid eine von  $0,15 \text{ mol}$ . Zu Anfang befanden sich im Reaktor nur Schwefeldioxid und Sauerstoff.
  - a) Stellen Sie die chemische Gleichung auf und erläutern Sie das Phänomen der konstanten Stoffmengen / Konzentrationen!
  - b) Machen Sie Aussagen zu(r) Reaktions-Geschwindigkeit(en) und beschreiben Sie die Verteilung der Edukte und Produkte in diesem System!

Welche Reaktion(en) sind hier bevorzugt / benachteiligt? Begründen Sie Ihre Meinung!

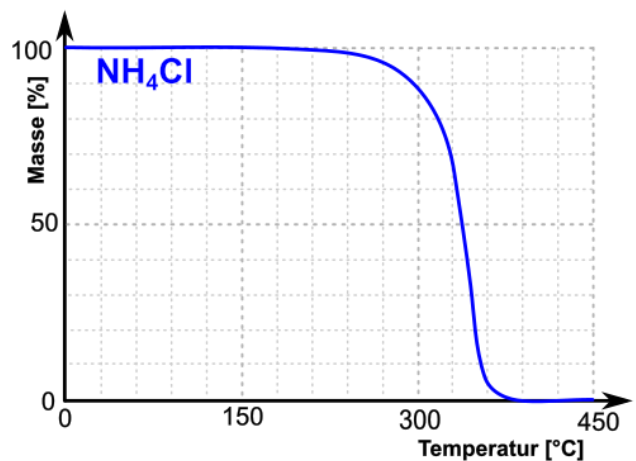
c) Berechnen Sie eine passende kinetische Konstante für dieses System!

x. Für das Recycling von Seltenerdenmetallen aus Elektro-Schrott experimentiert man derzeit mit dem Aufschluss mittels festem Ammoniumchlorid. Bei diesem Verfahren wird mit einer Temperatur gearbeitet, bei der Ammoniumchlorid anfängt, sich langsam zu zersetzen. Man erhält so ein nutzbares Gleichgewicht zwischen dem festem  $\text{NH}_4\text{Cl}$  und den Zersetzungsprodukten.

a) Stellen Sie die chemische Gleichung für die thermische Zersetzung von Ammoniumchlorid auf!

b) Prüfen Sie die Möglichkeiten zur Beeinflussung des Gleichgewichts durch Druck-Veränderung!

c) Gegeben ist die graphische Darstellung einer thermogravimetrischen Analyse. Informieren Sie sich über die Methode der Thermogravimetrie! Interpretieren Sie dann das Diagramm! Lesen Sie die Zersetzungstemperatur aus dem Diagramm ab und vergleichen Sie diese mit den Angaben z.B. aus einem Tafelwerk od. dem Internet!



d) Ermitteln Sie eine geeignete minimale Arbeits-Temperatur! Berechnen Sie für diese Temperatur die Gleichgewichts-Konstante über thermodynamische Kennwerte!

x.

---

## Anhänge

## Formeln der Tabellenkalkulation

### Erbsen-Einfach (stochastisches Modell)

|    | A            | B                   | C               | D               | E                                             | F                        | G                                   |
|----|--------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 1  | <b>Model</b> |                     |                 |                 |                                               |                          |                                     |
| 2  |              |                     |                 |                 |                                               |                          |                                     |
| 3  |              | Ablauf 1. Erbsen zu |                 |                 |                                               |                          |                                     |
| 4  |              | 2. erwürfel         |                 |                 |                                               |                          |                                     |
| 5  |              | 3. bewerte          |                 |                 |                                               |                          |                                     |
| 6  |              | EA (Aktiv           |                 |                 |                                               |                          |                                     |
| 7  |              |                     |                 |                 |                                               |                          |                                     |
| 8  |              | Start               |                 |                 |                                               | min EA (1-->6)           |                                     |
| 9  |              | 30                  | 0               |                 |                                               | 5                        |                                     |
| 10 |              |                     |                 |                 |                                               |                          |                                     |
| 11 |              | <b>Takt</b>         | <b>Erbsen A</b> | <b>Erbsen B</b> | <b>gezogene Erbsen</b>                        | <b>erwürfelte Energ.</b> | <b>Umsatz</b>                       |
| 12 |              | 0                   | =C9             | =D9             | =WENN(ZUFALLSBEREICH(0;C12+D12)<=C12;"A";"B") | =ZUFALLSBEREICH(1;6)     | =WENN(UND(E12="A";F12>=\$F\$9);1;0) |
| 13 |              | 1                   | =C12-G12        | =D12+G12        | =WENN(ZUFALLSBEREICH(0;C13+D13)<=C13;"A";"B") | =ZUFALLSBEREICH(1;6)     | =WENN(UND(E13="A";F13>=\$F\$9);1;0) |
| 14 |              | 2                   | =C12-G13        | =D12+G13        | =WENN(ZUFALLSBEREICH(0;C14+D14)<=C14;"A";"B") | =ZUFALLSBEREICH(1;6)     | =WENN(UND(E14="A";F14>=\$F\$9);1;0) |

ab Takt 1 können die Formeln mit dem Ausfüller kopiert werden

### Erbsen-Einfach (deterministisches Modell)

|    | A          | B                 | C               | D               | E                        | F                          |
|----|------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|
| 1  | <b>Mod</b> |                   |                 |                 |                          |                            |
| 2  |            |                   |                 |                 |                          |                            |
| 3  |            | Ablauf 1. Berechn |                 |                 |                          |                            |
| 4  |            | 2. ermitte        |                 |                 |                          |                            |
| 5  |            |                   |                 |                 |                          |                            |
| 6  |            |                   |                 |                 |                          |                            |
| 7  |            |                   |                 |                 |                          |                            |
| 8  |            | Start             |                 | gezogen insg.   | min EA (1-->6)           |                            |
| 9  |            | 300               | 0               | 10              | 3                        |                            |
| 10 |            |                   |                 |                 |                          |                            |
| 11 |            | <b>Takt</b>       | <b>Erbsen A</b> | <b>Erbsen B</b> | <b>gezogene Erbsen A</b> | <b>Anteil reag. Erbsen</b> |
| 12 |            | 0                 | =C9             | =D9             | =C12/(C12+D12)*\$E\$9    | =E12-E12*((\$F\$9-1)/6)    |
| 13 |            | 1                 | =C12-F12        | =D12+F12        | =C13/(C13+D13)*\$E\$9    | =E13-E13*((\$F\$9-1)/6)    |
| 14 |            | 2                 | =C12-E13        | =D12+E13        | =C14/(C14+D14)*\$E\$9    | =E14-E14*((\$F\$9-1)/6)    |

ab Takt 1 können die Formeln mit dem Ausfüller kopiert werden

## Erbsen-Doppel (stochastisches Modell)

|    | A      | B              | C          | D                                             | E                                             | F                    | G                                            | H |
|----|--------|----------------|------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------|---|
| 1  | Modell |                |            |                                               |                                               |                      |                                              |   |
| 2  |        |                |            |                                               | 2 A ---> 2 B                                  |                      |                                              |   |
| 3  |        |                |            |                                               |                                               |                      |                                              |   |
| 4  | Ablauf | 1. 2 Erbsen zu |            |                                               |                                               |                      |                                              |   |
| 5  |        | 2. erwürfeln   |            |                                               |                                               |                      |                                              |   |
| 6  |        | 3. bewerten    |            |                                               |                                               |                      |                                              |   |
| 7  |        | EA (Aktivie    |            |                                               |                                               |                      |                                              |   |
| 8  |        |                |            |                                               |                                               |                      |                                              |   |
| 9  |        | Start          |            |                                               |                                               |                      | min EA (1-->6)                               |   |
| 10 |        | 30             | 0          |                                               |                                               |                      | 5                                            |   |
| 11 |        |                |            |                                               |                                               |                      |                                              |   |
| 12 | Takt   | Erbsen A       | Erbsen B   | gezogene Erbse1                               | gezogene Erbse2                               | erwürfelte Energ.    | Umsatz                                       |   |
| 13 | 0      | =C10           | =D10       | =WENN(ZUFALLSBEREICH(0;C13+D13)<=C13;"A";"B") | =WENN(ZUFALLSBEREICH(0;C13+D13)<=C13;"A";"B") | =ZUFALLSBEREICH(1;6) | =WENN(UND(E13="A";F13="A";G13>=\$G\$10);1;0) |   |
| 14 | 1      | =C13-2*H13     | =D13+2*H13 | =WENN(ZUFALLSBEREICH(0;C14+D14)<=C14;"A";"B") | =WENN(ZUFALLSBEREICH(0;C14+D14)<=C14;"A";"B") | =ZUFALLSBEREICH(1;6) | =WENN(UND(E14="A";F14="A";G14>=\$G\$10);1;0) |   |
| 15 | 2      | =C14-2*H14     | =D14+2*H14 | =WENN(ZUFALLSBEREICH(0;C15+D15)<=C15;"A";"B") | =WENN(ZUFALLSBEREICH(0;C15+D15)<=C15;"A";"B") | =ZUFALLSBEREICH(1;6) | =WENN(UND(E15="A";F15="A";G15>=\$G\$10);1;0) |   |

ab Takt 1 können die Formeln mit dem Ausfüller kopiert werden

## Erbsen-Doppel (deterministisches Modell)

|    | A      | B          | C        | D                                     | E                     | F |
|----|--------|------------|----------|---------------------------------------|-----------------------|---|
| 1  | Modell |            |          |                                       |                       |   |
| 2  |        |            |          |                                       |                       |   |
| 3  | Ablauf | 1. Berechn |          |                                       |                       |   |
| 4  |        | 2. ermitte |          |                                       |                       |   |
| 5  |        |            |          |                                       |                       |   |
| 6  |        |            |          |                                       |                       |   |
| 7  |        |            |          |                                       |                       |   |
| 8  |        | Start      |          | gezogen insg.                         | min EA (1-->6)        |   |
| 9  |        | 300        | 0        | 10                                    | 3                     |   |
| 10 |        |            |          |                                       |                       |   |
| 11 | Takt   | Erbsen A   | Erbsen B | gezogene Erbsen AA                    | Anteil reag. Erbsen   |   |
| 12 | 0      | =C9        | =D9      | =C12/((C12+D12)*C12/((C12+D12)*\$E\$9 | =E12-E12*(\$F\$9-1)/6 |   |
| 13 | 1      | =C12-F12   | =D12+F12 | =C13/((C13+D13)*C13/((C13+D13)*\$E\$9 | =E13-E13*(\$F\$9-1)/6 |   |
| 14 | 2      | =C13-F13   | =D13+F13 | =C14/((C14+D14)*C14/((C14+D14)*\$E\$9 | =E14-E14*(\$F\$9-1)/6 |   |

ab Takt 1 können die Formeln mit dem Ausfüller kopiert werden



## Erbsen-Quartet (stochastisches Modell)

|    | A      | B          | C        | D        | E        | F                                  | G       | H                                                                         | I |
|----|--------|------------|----------|----------|----------|------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------|---|
| 1  | Moc    |            |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |
| 2  |        |            |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |
| 3  |        |            |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |
| 4  | Ablauf | 1. 2 Erbse |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |
| 5  |        | 2. erwürfe |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |
| 6  |        | 3. bewert  |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |
| 7  |        | EA (Akti   |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |
| 8  |        |            |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |
| 9  |        | Start      |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |
| 10 |        | 30         | 30       | 0        | 0        |                                    |         |                                                                           |   |
| 11 |        |            |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |
| 12 | Takt   | Erbsen A   | Erbsen B | Erbsen C | Erbsen D | Zufall1                            | Zufall2 | gezogene Erbse1                                                           |   |
| 13 | 0      | =C10       | =D10     | =E10     | =F10     | =ZUFALLSBEREICH(0;C13+D13+E13+F13) | =ZUFAL  | =WENN(G13<=C13+D13;WENN(G13<=C13;"A";"B");WENN(G13<=C13+D13+E13;"C";"D")) |   |
| 14 | 1      | =C13-L13   | =D13-L13 | =E13+L13 | =F13+L13 | =ZUFALLSBEREICH(0;C14+D14+E14+F14) | =ZUFAL  | =WENN(G14<=C14+D14;WENN(G14<=C14;"A";"B");WENN(G14<=C14+D14+E14;"C";"D")) |   |
| 15 |        |            |          |          |          |                                    |         |                                                                           |   |

Fortsetzung:

|    | J                                       | K                                                                             | L      |
|----|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1  |                                         |                                                                               |        |
| 2  |                                         |                                                                               |        |
| 3  |                                         |                                                                               |        |
| 4  |                                         |                                                                               |        |
| 5  |                                         |                                                                               |        |
| 6  |                                         |                                                                               |        |
| 7  |                                         |                                                                               |        |
| 8  |                                         |                                                                               |        |
| 9  |                                         | min EA (1-->6)                                                                |        |
| 10 |                                         | 3                                                                             |        |
| 11 |                                         |                                                                               |        |
| 12 | gezogene Erbse2                         | erwürfelte Energ.                                                             | Umsatz |
| 13 | =WENN(H13<=C13+D13;=ZUFALLSBEREICH(1;6) | =WENN(UND(ODER(UND(I13="A";J13="B");UND(I13="B";J13="A")));K13>=\$K\$10);1;0) |        |
| 14 | =WENN(H14<=C14+D14;=ZUFALLSBEREICH(1;6) | =WENN(UND(ODER(UND(I14="A";J14="B");UND(I14="B";J14="A")));K14>=\$K\$10);1;0) |        |
| 15 |                                         |                                                                               |        |

ab Takt 1 können die Formeln mit dem Ausfüller kopiert werden

## Erbsen-Kaskade (Katalyse; stochastisches Modell)

Fortsetzung von der Kalkulation: → Erbsen-Einfach (stochastisches Modell) (Original-Modell gut für Vergleiche geeignet.)

|    | H | I        | J            | K        | L                                  | M                                             | N                    | O                                     | P                                     | Q          |
|----|---|----------|--------------|----------|------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
| 1  |   |          |              |          |                                    |                                               |                      |                                       |                                       |            |
| 2  |   |          |              |          |                                    |                                               |                      |                                       |                                       |            |
| 3  |   |          |              |          |                                    |                                               |                      |                                       |                                       |            |
| 4  |   |          |              |          |                                    |                                               |                      |                                       |                                       |            |
| 5  |   |          |              |          |                                    |                                               |                      |                                       |                                       |            |
| 6  |   |          |              |          |                                    |                                               |                      |                                       |                                       |            |
| 7  |   |          |              |          |                                    |                                               |                      |                                       |                                       |            |
| 8  |   |          |              |          |                                    |                                               |                      |                                       |                                       |            |
| 9  |   |          |              |          |                                    |                                               |                      |                                       |                                       |            |
| 10 |   |          |              | Start    |                                    |                                               | min EA (1-->6)       |                                       |                                       |            |
| 11 |   |          |              | 0        |                                    |                                               | [A --> Z] 2          |                                       |                                       |            |
| 12 |   |          |              |          |                                    |                                               | [Z --> B] 2          |                                       |                                       |            |
| 13 |   | Erbsen A | Erbsen Z     | Erbsen B | ZufallsZ.                          | gezogene Erbse                                | erwürfelte Energ.    | Umsatz A-->Z                          | Umsatz Z-->B                          | Erbsen Z+B |
| 14 |   | =C11     | =D11         | =K11     | =ZUFALLSBEREICH(1;((I14+J14+K14))) | =WENN(L14>I14;WENN(L14<=I14+J14;"Z";"B");"A") | =ZUFALLSBEREICH(1;6) | =WENN(M14="A";WENN(N14>=N\$10;1;0);0) | =WENN(M14="Z";WENN(N14>=N\$11;1;0);0) | =J14+K14   |
| 15 |   | =I14-O14 | =J14+O14-P14 | =K14+P14 | =ZUFALLSBEREICH(1;((I15+J15+K15))) | =WENN(L15>I15;WENN(L15<=I15+J15;"Z";"B");"A") | =ZUFALLSBEREICH(1;6) | =WENN(M15="A";WENN(N15>=N\$10;1;0);0) | =WENN(M15="Z";WENN(N15>=N\$11;1;0);0) | =J15+K15   |
| 16 |   | =I15-O15 | =J15+O15-P15 | =K15+P15 | =ZUFALLSBEREICH(1;((I16+J16+K16))) | =WENN(L16>I16;WENN(L16<=I16+J16;"Z";"B");"A") | =ZUFALLSBEREICH(1;6) | =WENN(M16="A";WENN(N16>=N\$10;1;0);0) | =WENN(M16="Z";WENN(N16>=N\$11;1;0);0) | =J16+K16   |

ab Takt 1 können die Formeln mit dem Ausfüller kopiert werden

## Erbsen-Kaskade (Katalyse; deterministisches Modell)

Fortsetzung von der Kalkulation: → Erbsen-Einfach (deterministisches Modell) (Original-Modell gut für Vergleiche geeignet.)

|    | G | H        | I            | J        | K                         | L                         | M                         | N                   | O                   | P          |
|----|---|----------|--------------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|------------|
| 1  |   |          |              |          |                           |                           |                           |                     |                     |            |
| 2  |   |          |              |          |                           |                           |                           |                     |                     |            |
| 3  |   |          |              |          |                           |                           |                           |                     |                     |            |
| 4  |   |          |              |          |                           |                           |                           |                     |                     |            |
| 5  |   |          |              |          |                           |                           |                           |                     |                     |            |
| 6  |   |          |              |          |                           |                           |                           |                     |                     |            |
| 7  |   |          |              |          |                           |                           |                           |                     |                     |            |
| 8  |   |          |              | Start    |                           |                           | min EA (1-->6)            | min EA (1-->6)      |                     |            |
| 9  |   |          |              | 0        |                           |                           | 2                         | 1                   |                     |            |
| 10 |   |          |              |          |                           |                           |                           |                     |                     |            |
| 11 |   | Erbsen A | Erbsen Z     | Erbsen B | gez. Erbsen A             | gez. Erbsen Z             | gez. Erbsen B             | Ant.reag.Erbsen A   | Ant.reag. Erbsen Z  | Erbsen Z+B |
| 12 |   | =C9      | =D9          | =J9      | =H12/(H12+H12+J12)*\$E\$9 | =I12/(H12+H12+J12)*\$E\$9 | =J12/(H12+H12+J12)*\$E\$9 | =K12-K12*(N\$9-1)/6 | =L12-L12*(O\$9-1)/6 | =I12+J12   |
| 13 |   | =H12-N12 | =I12+N12-O12 | =J12+O12 | =H13/(H13+H13+J13)*\$E\$9 | =I13/(H13+H13+J13)*\$E\$9 | =J13/(H13+H13+J13)*\$E\$9 | =K13-K13*(N\$9-1)/6 | =L13-L13*(O\$9-1)/6 | =I13+J13   |
| 14 |   | =H13-N13 | =I13+N13-O13 | =J13+O13 | =H14/(H14+H14+J14)*\$E\$9 | =I14/(H14+H14+J14)*\$E\$9 | =J14/(H14+H14+J14)*\$E\$9 | =K14-K14*(N\$9-1)/6 | =L14-L14*(O\$9-1)/6 | =I14+J14   |

ab Takt 1 können die Formeln mit dem Ausfüller kopiert werden

## Literatur und Quellen:

- /1/ WÜNSCH, Prof. Dr. Karl-Heinz; MIETCHEN, Doz. Dr. Ralf; EHLERS, Dr. Dieter:  
Organische Chemie – Grundkurs.- Berlin: Dt. Verl. d. Wissenschaften; 1986; 5. be-  
richt. Aufl.  
ISSN 0233-0806
- /2/ FITTKAU, Dr. Siegfried:  
Organische Chemie.-Jena: G. Fischer Verl.; 1984; 5., überarb. Aufl.
- /3/ BOTSCH, Walter; HÖFLING, Erich; MAUCH, Jürgen:  
Chemie ind Versuch, Theorie und Übung.- Frankfurt am Main: Verl. M. Diesterweg;  
Aarau, Frankfurt am Main, Salzburg: Verl. Sauerländer; 1984; 2., neubearb. Aufl.  
ISBN 3-425-95421-0  
ISBN 3-7941-2522-3
- /4/ HÄUSLER, Karl:  
Chemie kompakt – Formeln, Regeln, Gesetze.-München: R. Oldenburg Verl.; 1994;  
1. Aufl.  
ISBN 3-486-88567-7
- /5/ SCHLEIP, Alfred; KÖHLER, Georg:  
Fundamentum CHEMIE – Sekundarstufe I – Lehr- und Arbeitsbuch.-Bonn: Ferd.  
Dümmlers Verl.; 1994  
ISBN 3-427-43101-0
- /6/ LÜTHJE – GALL - REUBER:  
Verf.: THOMAS, Dr. Wolfgang; QUANTE, Marion; QUANTE, Uwe; HEFELE, Gerd:  
Lehrbuch der Chemie – Organische Chemie.-Frankfurt am Main: Verl. M. Diesterweg;  
1983  
ISBN 3-425-050496-6
- /7/ WHITE, Emil H.:  
Grundlagen der Chemie für Biologen und Mediziner.-Stuttgart: Kosmos – Gesell. d.  
Naturfreunde; Franckh'sche Verlagshandlung; 1973.- 3. verbesserte Aufl.  
ISBN 3-440-03981-1
- /8/ Chemie – Lehrbuch für Klasse 9  
(TEICHMANN, Jochen; OBST, Heinz; ARNDT, Barbara); Hrsg.: TEICHMANN;  
Berlin: Volk u. Wissen Verl.; 1980; 11. Aufl.
- /9/ Chemie – Lehrbuch für Klasse 8  
(ARNDT, Barbara; LANGE, Peter; OBST, Heinz; TEICHMANN, Jochen);  
Berlin: Volk u. Wissen Verl.; 1985; 6. Aufl.
- /10/ Organische Chemie – Lehrbuch für die Oberschule 9. und 10. Klasse  
(HRADETZKY, Albert; WOLFFGRAMM, Horst; RENNEBERG, Werner);  
Berlin: Volk u. Wissen Verl.; 1967
- /11/ Schüler-DUDEN: Die Chemie  
Mannheim: Bibliogr. Inst. & F. A. Brockhaus; überarb. Aufl.  
ISBN

- 
- /12/ HAFNER, Lutz:  
Biochemie – Materialien für den Sekundarbereich II – Chemie.-Hannover: Schroedel Schulbuchverl.; 1993  
ISBN 3-507-10604-3
- /13/ HAFNER, Lutz:  
Einführung in die Organische Chemie – Unter besonderer Berücksichtigung der Biochemie – Materialien für den Sekundarbereich II – Chemie.-Hannover: Schroedel Schulbuchverl.; 1976; 2. Aufl.  
ISBN 3-507-10600-0
- /14/ OEHMICHEN, Jobst:  
Chemie für Landwirte.-Alfeld-Hannover: Verl. M. & H. Schaper; 1989.-2. überarb. u. erw. Aufl.  
ISBN 3-7944-0147-6
- /15/ ANDERS, A.; DEIBNER, H.; PAAR, F.; SCHWARZER, J.; SINDEL, G.:  
Chemie – Fachschule Technik.-Troisdorf: Bildungsverl. EINS (Stam); 1994.-2. Aufl.  
ISBN 3-8237-0039-1
- /16/ HACKL, Manfred; VOLKMANN, Hans; ...:  
Chemie für Fachoberschulen – Ausgabe B.-Stuttgart, Dresden: Klett Verl. f. Wissen u. Bildung; 1993.-1. Aufl.  
ISBN 3-12-804300-0
- /17/ JÄCKL, Manfred; RISCH, Karl (Hrsg.):  
Chemie heute – Sekundarbereich II.-Hannover: Schroedel Schulbuchverl.; 1991  
ISBN 3-507-10618-3
- /18/ HABERDITZL, W.:  
Bausteine der Materie und chemische Bindung.-Berlin: Verl. d. Wiss.; 1972.-Studienbücherei "Ausgewählte Lernabschnitte der Chemie"
- /19/ BLASCHETTE, Armand:  
Allgemeine Chemie II – Chemische Reaktionen.- Heidelberg, Wiesbaden: Quelle & Meyer; 1993.-3. durchges. Aufl.  
ISBN 3-494-02195-3 (UTB: 3-8252-1713-2)
- /20/ LATSCHA, Hans Peter; MUTZ, Martin:  
Chemie der Elemente – Chemie-Basiswissen IV.-Berlin, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verl.; 2011  
ISBN 978-3-642-16914-4
- /21/ KIRSCH, Wolfgang; MANGOLD, Marietta; SCHLACHTER, Brigitte; TSCHIEDEL, Martina:  
Abitur clever vorbereitet – Chemie.-Potsdam: Tandem Verl. / BSV.-Schülerhilfe  
ISBN 978-3-8427-0361-2
- /22/ ACKERMANN, Gerhard; ...:  
Elektrolytgleichgewichte und Elektrochemie (Lehrwerk Chemie Lehrbuch 5).-Leipzig: Dt. Verl. f. Grundstoffindustrie, 1977.-2. durchges. Aufl.
- /23/ SCHWERTLICK, Klaus, ...:  
Chemische Kinetik (Lehrwerk Chemie Lehrbuch 6).-Leipzig: Dt. Verl. f. Grundstoffindustrie, 1973.-1. Aufl.

- 
- /24/ PSCHEIDL, H.; et.al.:  
Allgemeine Chemie – Grundkurs.-Berlin: Dt. Verl. d. Wissenschaften, 1985.-3., be-  
richt. Aufl.
- /25/ WAMBACH, Heinz (Hrsg.):  
Materialien-Handbuch Kursunterricht Chemie Band 3 – Kinetik – Gleichgewicht –  
Massenwirkungsgesetz.-Köln: Aulis Verl. Deubner, 1993  
ISBN 3-7614-1486-2
- /25/ :  
  
ISBN 978-3-

- /A/ Wikipedia  
<http://de.wikipedia.org>
- /B/ Experimentas (Sammlung Schul-geeigneter Experimente)  
<https://experimentas.de>

Die originalen sowie detailliertere bibliographische Angaben zu den meisten Literaturquellen sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> zu finden.

### Abbildungen und Skizzen entstammen den folgende ClipArt-Sammlungen:

- /A/ 29.000 Mega ClipArts; NBG EDV Handels- und Verlags AG; 1997

/B/

andere Quellen sind direkt angegeben.

### Alle anderen Abbildungen sind geistiges Eigentum von:

- // lern-soft-projekt: draws (c,p) 1997-2022 lsp: dre  
 für die Verwendung außerhalb dieses Skriptes gilt für sie die Lizenz:



**CC-BY-NC-SA**



Lizenz-Erklärungen und –Bedingungen: <http://de.creativecommons.org/was-ist-cc/>  
 andere Verwendungen nur mit schriftlicher Vereinbarung!!!

### verwendete freie Software:

| Programm          | Hersteller:                                                                                              |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Inkscape</b>   | inkscape.org ( <a href="http://www.inkscape.org">www.inkscape.org</a> )                                  |
| <b>CmapTools</b>  | Institute for Human and Maschine Cognition ( <a href="http://www.ihmc.us">www.ihmc.us</a> )              |
| <b>ChemSketch</b> | ACD Labs (Advanced Chemistry Development, Inc.) ( <a href="http://www.acdlabs.com">www.acdlabs.com</a> ) |
|                   |                                                                                                          |

### weitere verwendete Software / Apps:

| Programm          | Hersteller:   |
|-------------------|---------------|
| <b>chemix.org</b> | Codelite Ltd. |
|                   |               |
|                   |               |
|                   |               |

☒ (c,p)1998 - 2022 lern-soft-projekt: draws ☒  
 ☒ [drews@lern-soft-projekt.de](mailto:drews@lern-soft-projekt.de) ☒  
 ☒ <http://www.lern-soft-projekt.de> ☒  
 ☒ 18069 Rostock; Luise-Otto-Peters-Ring 25 ☒  
 ☒ Tel/AB (0381) 760 12 18 FAX 760 12 11 ☒

## Hilfs-Tabellen, Formeln, Schemata etc. zum Ausdrucken

| extensive Größe | Symbol | Einheit                                                   | Definition                  | Bemerkung(en) |
|-----------------|--------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------|
| Masse           | m      | g kg t                                                    | SI-Einheit                  |               |
| Volumen         | V      | cm <sup>3</sup> dm <sup>3</sup> m <sup>3</sup><br>ml l hl | abhängig von der Körperform |               |
| Stoffmenge      | n      | mol                                                       | SI-Einheit                  |               |
| innere Energie  | U      | J                                                         | $U = Q + W$                 |               |

| intensive Größe | Symbol         | Einheit                                           | Definition               | Bemerkung(en)                                    |
|-----------------|----------------|---------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|
| Temperatur      | T              | K                                                 | SI-Einheit               |                                                  |
|                 | θ              | °C                                                | $\vartheta = T - 273,15$ |                                                  |
| Druck           | p              | Pa                                                | $p = \frac{F}{A_0}$      | 1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup><br>1 atm = 101,325 kPa |
| Dichte          | ρ              | g/cm <sup>3</sup> kg/dm <sup>3</sup><br>g/ml kg/l | $\rho = \frac{m}{V}$     |                                                  |
| molare Masse    | M              | g/mol                                             | $M = \frac{m}{n}$        |                                                  |
| molares Volumen | V <sub>M</sub> | l/mol                                             | $V_M = \frac{V}{n}$      |                                                  |
| Heizwert        | H HW           | kJ/kg                                             | $HW = \frac{Q}{m}$       |                                                  |
| Konzentration   | c              | mol/l                                             | $c = \frac{n}{V}$        | 1 M = 1 mol/l                                    |

## Thermodynamik

| Energie-Form              | Formel                                    | Energie-Form                | Formel                                   |
|---------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|
| potentielle Energie       | $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$             | Licht- / Strahlungs-Energie | $E_{photon} = h \cdot f$                 |
| kinetische Energie        | $E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$       |                             |                                          |
| elektrische Energie       | $E_{elek} = U \cdot I \cdot t$            | Rotations-Energie           | $E_{rot} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$ |
| Arbeit (Energie-Änderung) | $W = E_2 - E_1$<br>$W = F \cdot \Delta s$ |                             |                                          |

### Umrechnungen und Namen weiterer Energie-Einheiten:

| Zeichen | ausgeschriebenen<br>gesprochen     | Umrechnung(en)                                        | Zeich. | ausgesch. gesprochen                     | Umrechnung(en)                   |
|---------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------|------------------------------------------|----------------------------------|
| Nm      | Newton Meter<br><i>njutenmeter</i> | 1 Nm = 1 J                                            | erg    | <i>erg</i>                               | 1 erg = 0,1 * 10 <sup>-6</sup> J |
| Ws      | Watt Sekunde<br><i>wattsekunde</i> | 1 Ws = 1 VAs = 1 J<br>1 kWh = 3,6 * 10 <sup>6</sup> J | eV     | Elektronen Volt<br><i>elektronenvolt</i> | 1 eV = 1,6 * 10 <sup>-19</sup> J |
| cal     | Calorie<br><i>kalorie</i>          | 1 cal = 4,187 J                                       | SKE    | Steinkohlen-einheit                      | 1 SKE = 29,3 MJ                  |

| Volumen        | Druck      | Arbeit               |                 | Vorzeichen |  |
|----------------|------------|----------------------|-----------------|------------|--|
| $\Delta V > 0$ | p = const. | Abgabe durch System  | <b>W &lt; 0</b> | -          |  |
| $\Delta V < 0$ | p = const. | Aufgabe durch System | <b>W &gt; 0</b> | +          |  |

|                      | Temperatur<br>T [K] | Druck<br>p [kPa] |  |  | mol. Volumen<br>V <sub>M</sub> [l / mol] |
|----------------------|---------------------|------------------|--|--|------------------------------------------|
| Standard-Bedingungen | 298                 | 101,3            |  |  | 24,2                                     |
| Norm-Bedingungen     | 273                 | 101,3            |  |  | 22,4                                     |

|                                  |                                |
|----------------------------------|--------------------------------|
| $\Delta U = U_{End} - U_{Start}$ | $\Delta_R U = U_{RP} - U_{AS}$ |
|----------------------------------|--------------------------------|

|                                                                                                                                                                                    |                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>p const. (isobarer Prozess)</b>                                                                                                                                                 | <b>V const. (isochorer Prozess, <math>\Delta V = 0</math>)</b> |
| $\Delta U = Q_p + W_{Vol} = \Delta_R E$<br>$W = p \cdot (V_2 - V_1) = p \cdot \Delta V$<br>$Q_p = H_2 - H_1 = \Delta H$<br>$\Delta H = \Delta U + p \cdot \Delta V = \Delta U - W$ | $Q_V = \Delta U = \Delta_R E$                                  |

|                                                            |                                                                           |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>Wärmekapazität eines Kalorimeter's</b>                  | <b>Aktivierungs-Energie</b>                                               |
| $C = \frac{Q}{\Delta T}$<br>$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ | $E_A = R \cdot \frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{k_2}{k_1}$ |

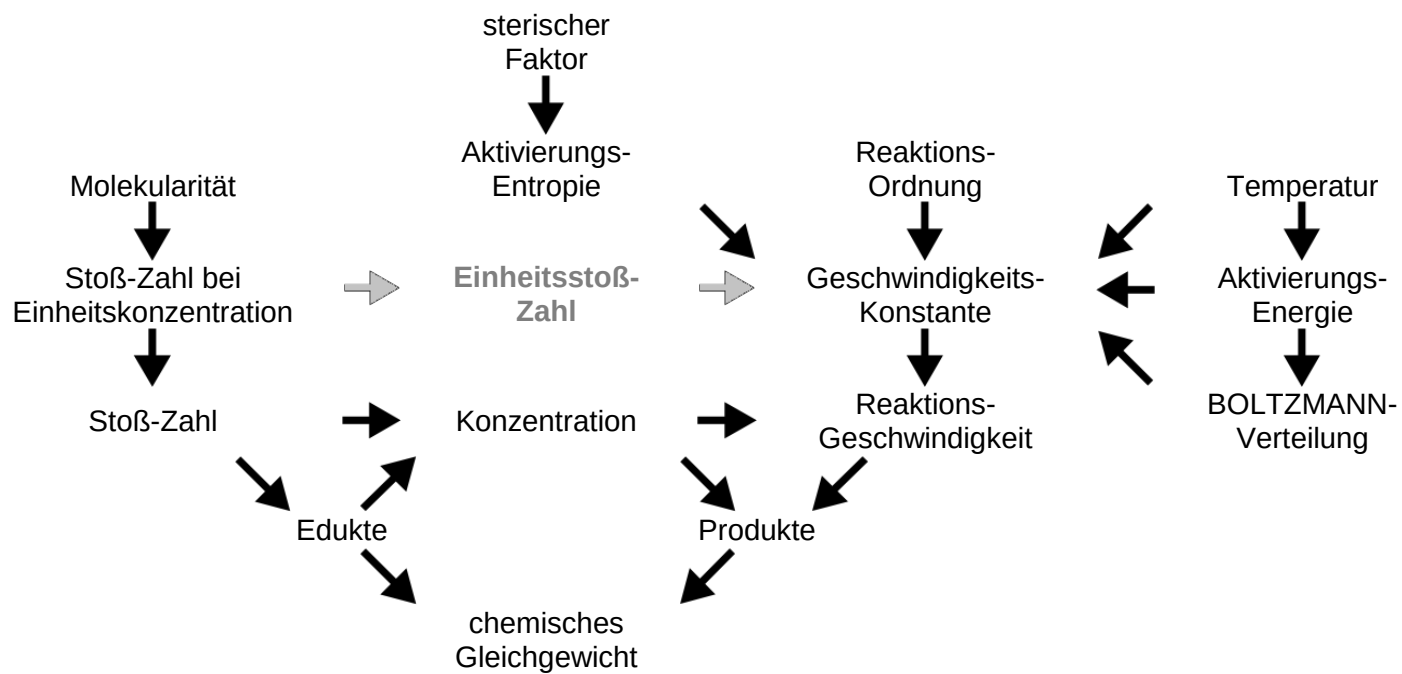
|                                       |                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Standardisierung</b>               | <b>Satz von HESS</b>                                                                                                                                                                                           |
| $\Delta_R U_m = \frac{\Delta_R U}{n}$ | $\Delta_R H^0 = \sum (\nu \cdot \Delta_B H_m^0 [\text{Prod}]) - \sum (\nu \cdot \Delta_B H_m^0 [\text{Eduk}])$<br>$\Delta_R H_{A \rightarrow C} = \Delta_R H_{A \rightarrow B} + \Delta_R H_{B \rightarrow C}$ |

|                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Symbole / Größen / Einheiten</b>                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                          |
| E ... Energie (allg.) [J]<br>Q ... Wärme-Menge / -Energie [J]<br>$Q_V$ ... Q bei V=const.<br>$Q_p$ ... Q bei p=const.<br>W ... Arbeit<br>$W_{Vol}$ ... Volumen-Arbeit | C ... Wärme-Kapazität []<br>c ... spezifische Wärme-Kapazität []<br>$\Delta ??$ ... Veränderung der Größe ?? (= $??_2 - ??_1$ )<br>$\Delta_R ??$ ... Veränderung im Reaktionsverlauf<br>R ... universelle Gas-Konstante [8,3145 J/K*mol] |

### Massenwirkungs-Gesetz

$$K_c = \frac{\prod c_{RP}}{\prod c_{AS}} \quad K_p = \frac{\prod p_{iRP}}{\prod p_{iAS}}$$





Q: /25, S. 82 + 108 + 119/; leicht geändert: dre