

# I Mechanik

## Inhaltsverzeichnis

	Kapitel	Seite
<b>A</b>	<b>Statik</b>	<b>A 1</b>
<b>1</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>A 1</b>
1.1	Die Aufgaben der Statik	A 1
1.2	Physikalische Größen in der Statik	A 1
1.3	Die Kraft $F$	A 2
1.4	Das Drehmoment $M$	A 3
<b>2</b>	<b>Schwerpunktslehre</b>	<b>A 5</b>
2.1	Schwerlinie, Schwerebene und Schwerpunkt	A 5
2.2	Gleichgewichtslagen und Standsicherheit	A 5
2.2.1	Gleichgewichtslagen	A 5
2.2.2	Standsicherheit	A 6
2.3	Aufgaben zur Schwerpunktslehre	A 7
<b>3</b>	<b>Das Freimachen der Bauteile (Freischneiden)</b>	<b>A 8</b>
3.1	Oberflächen- und Volumenkräfte	A 8
3.2	Regeln zum Freimachen (Freischneiden)	A 9
3.2.1	Seile, Ketten, Riemen	A 9
3.2.2	Zweigelenkstäbe = Pendelstützen	A 9
3.2.3	Berührungsflächen (ebene Stützflächen)	A 10
3.2.4	Rollkörper (gewölbte Stützflächen)	A 11
3.2.5	Einwertige Lager (Loslager)	A 11
3.2.6	Zweiwertige Lager (Festlager)	A 12
3.3	Übungen zum Freimachen	A 12
3.4	Aufgaben zum Freimachen	A 15
<b>B</b>	<b>Die Grundaufgaben der Statik</b>	<b>B 1</b>
<b>1</b>	<b>Begriffserklärungen</b>	<b>B 1</b>
1.1	Zentrales und allgemeines Kräftesystem	B 1
1.2	Hauptaufgaben in der Statik	B 1
1.3	Die zwei Lösungsmethoden	B 2
<b>2</b>	<b>Grundaufgaben der Statik im allgemeinen Kräftesystem</b>	<b>B 2</b>
2.1	Rechnerische Ermittlung der Resultierenden	B 2
2.2	Momentensatz	B 5
2.3	Aufgaben zur Ermittlung der Resultierenden	B 7
2.4	Ermittlung unbekannter Kräfte	B 8
2.5	Aufgaben zur Ermittlung unbekannter Kräfte	B 10
<b>3</b>	<b>Zusatzaufgaben</b>	<b>B 11</b>
<b>C</b>	<b>Dynamik</b>	<b>C 1</b>
<b>1</b>	<b>Arbeit</b>	<b>C 1</b>
1.1	Arbeit einer konstanten Kraft	C 1
1.2	Zeichnerische Darstellung der Arbeit	C 2
1.3	Federarbeit $W_F$ (Formänderungsarbeit) als Arbeit einer veränderlichen Kraft	C 2
1.4	Aufgaben mit der Größe Arbeit	C 3
<b>2</b>	<b>Leistung</b>	<b>C 6</b>
2.1	Begriffserklärung	C 6
2.2	Aufgaben mit der Größe Leistung	C 7



<b>3</b>	<b>Wirkungsgrad</b>	<b>C 8</b>
3.1	Begriffserklärung	C 8
3.2	Aufgaben mit den Größen Arbeit, Leistung, Wirkungsgrad	C 9
<b>4</b>	<b>Impuls</b>	<b>C 10</b>
4.1	Impuls und Kraftstoß	C 10
4.1.1	Impuls	C 10
4.1.2	Kraftstoß	C 11
4.1.3	Impuls als Erhaltungsgröße	C 11
4.2	Stoßprozesse	C 12
4.2.1	Zentraler unelastischer Stoß	C 12
4.2.2	Schiefer unelastischer Stoß	C 13
4.2.3	Zentraler elastischer Stoß	C 13
4.2.4	Sonderfälle des elastischen Stoßes	C 14
4.3	Aufgaben zu Stoßprozessen	C 15
4.4	Aus Wissenschaft und Technik	C 15
<b>5</b>	<b>Gleichförmige Rotation (Kreisbewegung)</b>	<b>C 16</b>
5.1	Definitionen zur Kinematik der Rotation	C 16
5.1.1	Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit	C 16
5.1.2	Zeit-Gesetze	C 17
5.1.3	Periodendauer und Frequenz	C 17
5.1.4	Radialbeschleunigung	C 17
5.2	Aufgaben zur Kinematik der Rotation	C 18
5.3	Dynamik der Rotation	C 18
5.3.1	Masse und Kraft	C 18
5.3.2	Radialkraft	C 19
5.4	Aufgaben zur gleichförmigen Rotation	C 20
5.5	Aus Wissenschaft und Technik	C 20
<b>D</b>	<b>Schwingungen</b>	<b>D 1</b>
<b>1</b>	<b>Schwingung als periodischer Vorgang</b>	<b>D 1</b>
1.1	Definition	D 1
1.2	Kennzeichnende Größen	D 1
<b>2</b>	<b>Harmonische Schwingung</b>	<b>D 2</b>
2.1	Schwingungssysteme	D 2
2.1.1	Federpendel	D 2
2.1.2	Fadenpendel	D 2
2.1.3	Definition	D 2
2.2	Eigenschaften harmonischer Schwingungen	D 2
2.2.1	Weg-Zeit-Diagramm	D 2
2.2.2	Phasenwinkel	D 4
2.2.3	Periodendauer von Schwingungssystemen	D 4
2.3	Aufgaben	D 4
2.4	Gedämpfte Schwingung	D 5
2.5	Überlagerung harmonischer Schwingungen gleicher Frequenz	D 6
2.5.1	Phasengleiche Schwingungen	D 6
2.5.2	Phasendifferenz $\pi$	D 6
2.5.3	Beliebig phasenverschobene Schwingungen	D 7
2.5.4	Zusammenfassung	D 7
2.6	Eigenschwingung, erzwungene Schwingung und Resonanz	D 7
2.6.1	Eigenschwingung	D 7
2.6.2	Erzwungene Schwingung	D 7
2.6.3	Resonanz	D 7
2.7	Aufgaben	D 8
<b>3</b>	<b>Aus Wissenschaft und Technik</b>	<b>D 8</b>



## **II Werkstofftechnik**

### **Inhaltsverzeichnis**

	Kapitel	Seite
<b>A</b>	<b>Innerer Aufbau der Metalle</b>	<b>A 1</b>
<b>1</b>	<b>Innerer Aufbau, Eigenschaften</b>	<b>A 2</b>
1.1	Metallbindung und Festigkeit	A 2
1.2	Elektrische Leitfähigkeit	A 2
1.3	Verformungsverhalten der Metalle	A 2
<b>2</b>	<b>Kristallgittertypen (Elementarzellen) der Metalle</b>	<b>A 3</b>
2.1	Kubisch-raumzentriertes Kristallgitter	A 3
2.2	Kubisch-flächenzentriertes Kristallgitter	A 3
2.3	Hexagonales Kristallgitter	A 3
<b>3</b>	<b>Baufehler im Kristall</b>	<b>A 3</b>
<b>4</b>	<b>Entstehung des Metallgefüges</b>	<b>A 4</b>
<b>5</b>	<b>Gefügearten und Werkstoffeigenschaften</b>	<b>A 5</b>
5.1	Gefüge reiner Metalle	A 5
5.2	Gefüge von Legierungen	A 6
<b>6</b>	<b>Aufgaben</b>	<b>A 6</b>
<b>B</b>	<b>Gefügearten der Eisen-Werkstoffe</b>	<b>B 1</b>
<b>1</b>	<b>Eisen und Eisenverbindungen</b>	<b>B 1</b>
<b>2</b>	<b>Gefügearten in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt</b>	<b>B 1</b>
<b>3</b>	<b>Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild</b>	<b>B 4</b>
3.1	Die Achsen im Diagramm	B 4
3.2	Die Flächen im Diagramm	B 5
<b>4</b>	<b>Aufgaben</b>	<b>B 6</b>





# III Energietechnik

## Inhaltsverzeichnis

	Kapitel	Seite
<b>A</b>	<b>Energietechnik</b>	<b>A 1</b>
<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>A 1</b>
<b>2</b>	<b>Grundbegriffe der Energietechnik</b>	<b>A 2</b>
2.1	Erscheinungsformen der Energie	A 2
2.2	Energieerhaltung	A 3
2.3	Energiewandler und Wirkungsgrad	A 4
2.4	Energiewandlungskette	A 6
2.5	Energieversorgungssysteme	A 7
<b>3</b>	<b>Physikalische Grundlagen, Maßeinheiten</b>	<b>A 8</b>
3.1	Energie	A 8
3.2	Maßeinheiten	A 10
3.3	Formeln zur Energieberechnung	A 11
3.4	Aufgaben zur Energieberechnung	A 12
3.5	Energieerhaltungssatz für technische Vorgänge	A 13
3.6	Aufgaben zum Energieerhaltungssatz	A 14
<b>B</b>	<b>Entwicklung des Energieverbrauchs</b>	<b>B 1</b>
<b>1</b>	<b>Von der Muskelkraft zum Kernkraftwerk</b>	<b>B 1</b>
<b>2</b>	<b>Weltweiter Energieverbrauch</b>	<b>B 3</b>
<b>3</b>	<b>Energieverbrauch verschiedener Länder</b>	<b>B 6</b>
3.1	Primärenergieverbrauch	B 6
3.2	Energieverbrauch einer Familie	B 6
<b>4</b>	<b>Energieverbrauch in Luxemburg</b>	<b>B 7</b>
4.1	Energieverbrauch nach Verbrauchergruppen	B 7
4.2	Energieverbrauch nach Energieform	B 9
4.3	Herkunft der elektrischen Energie	B 10
<b>C</b>	<b>Regenerative Energien</b>	<b>C 1</b>
<b>1</b>	<b>Übersicht</b>	<b>C 1</b>
<b>2</b>	<b>Nutzung der Sonnenenergie</b>	<b>C 2</b>
2.1	Thermische Nutzung der Sonnenenergie	C 3
2.2	Photovoltaische Nutzung der Sonnenenergie	C 8
2.3	Solar-Wasserstoff-Technik	C 10
2.4	Windkraft	C 12
2.5	Biomasse	C 13
2.6	Sonstige	C 14
2.7	Ausblick	C 15





## **IV Elektrizitätslehre**

### **Inhaltsverzeichnis**

	Kapitel	Seite
<b>A</b>	<b>Wiederholung</b>	<b>A1</b>
1	Ohm'sches Gesetz	A1
2	Grundeigenschaften von Parallel- und Serienschaltung	A1
3	Reale Spannungsquelle	A1
<b>B</b>	<b>Kondensator</b>	<b>B1</b>
1	Elektrische Feldstärke	B1
2	Kapazität	B1
3	Plattenkondensator	B1
4	Arbeit	B2
5	Aus Wissenschaft und Technik	B3
<b>C</b>	<b>Elektromagnetismus</b>	<b>C1</b>
1	Magnetischer Fluß	C1
1.1	Magnetisches Feld eines geraden Leiters	C1
1.2	Magnetisches Feld einer Spule	C1
1.3	Magnetische Flußdichte	C2
1.4	Definition	C2
1.5	Aus Wissenschaft und Technik	C2
2	Elektromotorisches Prinzip	C3
2.1	Strom durchflossener Leiter im Magnetfeld	C3
2.2	Gleichstrommotor	C3
2.3	Aus Wissenschaft und Technik	C4





## Inhaltsverzeichnis

	Kapitel	Seite
<b>A</b>	<b>Elektrochemie</b>	<b>A 1</b>
<b>1</b>	<b>Redoxreaktionen</b>	<b>A 1</b>
1.1	Der Redoxbegriff	A 2
1.2	Oxidationszahlen	A 2
1.2.1	Begriffe und Erklärungen	A 2
1.2.2	Regeln zur Bestimmung der Oxidationszahlen	A 3
1.2.3	Redoxvorgänge	A 3
1.3	Redoxreaktionen zwischen Metallen und ihren Ionen	A 3
1.4	Elektroden	A 5
<b>2</b>	<b>Elektrochemische Spannungsreihe</b>	<b>A 5</b>
2.1	Redoxsysteme und Elektronendruck	A 5
2.2	Galvanisches Element	A 7
2.2.1	Halbzelle und Galvanische Zelle	A 7
2.2.2	Standardelektroden	A 8
2.2.3	Spannungsreihe der Elemente	A 8
2.3	Standardpotentiale	A 9



# E Schwingungen und Wellen

## 1 Schwingungen (Zusammenfassung)

### 1.1 Mechanische Schwingung

Eine mechanische Schwingung ist eine zeitlich periodische Bewegung eines Körpers um seine Gleichgewichtslage (Abb.1).

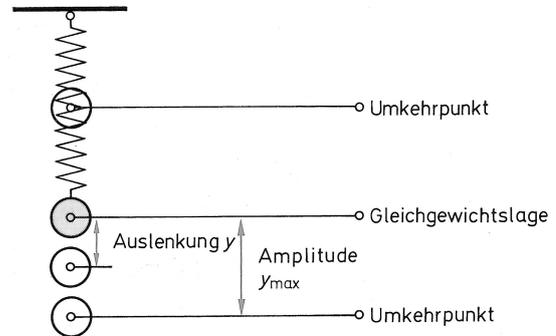


Abb.1: Mechanische Schwingung

Voraussetzungen für das Entstehen einer mechanischen Schwingung sind eine zur Gleichgewichtslage gerichtete rücktreibende Kraft und die Trägheit des schwingenden Körpers.

### 1.2 Harmonische Schwingung

Bei einer **harmonischen Schwingung** ist die rücktreibende Kraft proportional der Auslenkung aus der Gleichgewichtslage (Abb.2).

$$F = D \cdot y$$

F: Kraft in N  
D: Direktionsgröße in N/mm  
y: Auslenkung in mm

Die Direktionsgröße D oder Federkonstante c kennzeichnet die Härte einer Feder.

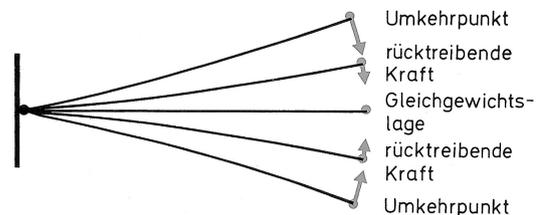


Abb.2: Harmonische Schwingung

Weg-Zeit-Gesetz einer harmonischen Schwingung.

$$y = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

y: Elongation (Auslenkung) in m  
y<sub>0</sub>: Amplitude in m  
ω: Winkelgeschwindigkeit in rad/s  
t: Zeit in s  
φ<sub>0</sub>: Phasenwinkel bei t = 0 in rad

Hinweis zum Kapitel „Schwingungen und Wellen“:

Auszüge aus Physik  
Volk und Wissen  
ISBN 3-06-021172-8

Höfling:  
Physik Band II Teil 1  
Dümmler 4114  
ISBN 3-427-41145-1



Das Weg-Zeit-Diagramm einer harmonischen Schwingung (Abb.3) ergibt eine Sinuskurve.

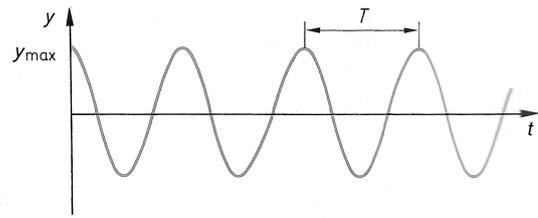


Abb.3: Weg-Zeit-Diagramm

Für die Periodendauer gilt:

Schwingungsgleichung eines Federpendels (Federschwingers)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}$$

T: Periodendauer in s  
m: Masse in kg  
D: Direktionsgröße in N/m

Schwingungsgleichung eines Fadenpendels

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

T: Periodendauer in s  
l: Fadenlänge in m  
g: Erdbeschleunigung in m/s<sup>2</sup>

### 1.3 Gedämpfte Schwingung

Wird beim Schwingen die mechanische Energie allmählich in eine andere Energieform umgewandelt, so ist die Schwingung gedämpft (Abb.4).

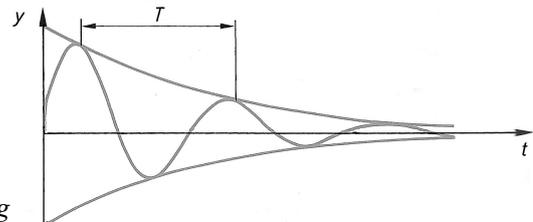
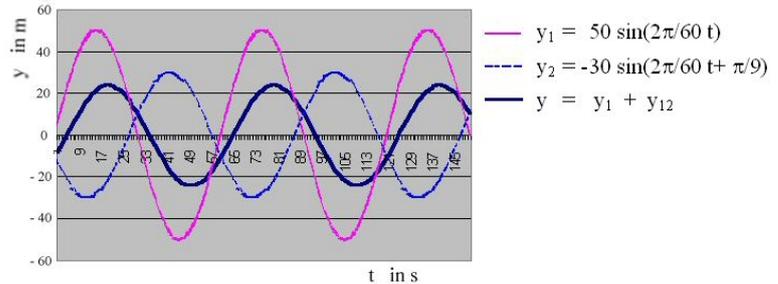


Abb.4: Gedämpfte Schwingung

### 1.4 Überlagerung harmonischer Schwingungen

Bei der Überlagerung frequenzgleicher harmonischer Schwingungen beliebiger Amplitude und Phase entsteht immer wieder eine harmonische Schwingung der gleichen Frequenz (Abb.5).

Abb.5: Überlagerung harmonischer Schwingungen gleicher Frequenz



### 1.5 Resonanz

Bei periodischer Erregung führt jeder Schwinger Schwingungen mit der Erregerfrequenz aus (erzwungene Schwingungen).

Wenn **Eigenfrequenz** des Schwingers und Erregerfrequenz übereinstimmen, dann treten die größten Amplituden auf. Erreger und Schwinger befinden sich dann in Resonanz (Abb.6).

Die Resonanz ist umso schlanker und höher, je geringer die Dämpfung des Schwingers ist.

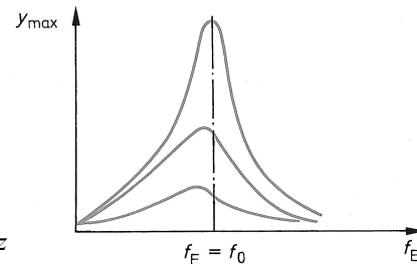


Abb.6: Resonanz

## 2 Mechanische Wellen

### 2.1 Entstehung

Wenn ein Stein ins Wasser fällt, wird die Wasseroberfläche zum Schwingen angeregt. Auch die Umgebung der Auftreffstelle gerät in Schwingungen. Der Prozeß setzt sich in Form einer kreisförmigen Welle fort (Abb.7).

Zwischen den Wasserteilchen wirken Kräfte. Durch diese beeinflußt jedes schwingende Teilchen die benachbarten Teilchen.



Abb.7: Schwingungen/Welle im Wasser

#### Schwingungsfähiges System

Verbindet man zwei gleichartige Federschwinger mit einem Gummifaden (Abb.8) entsteht ein einfaches **gekoppeltes Schwingungssystem**:

Wird der erste Schwinger ausgelenkt und losgelassen, klingt die Schwingung nach und nach ab. Gleichzeitig wird der zweite Schwinger zu immer stärkerem Mitschwingen erregt. Wenn die gesamte Energie auf den zweiten Schwinger übertragen ist und der erste Schwinger ruht, wiederholt sich der Vorgang indem der zweite Schwinger nun den ersten nach und nach in Bewegung versetzt.

Verwendet man mehrere Federschwinger nebeneinander, wird die Schwingung nach und nach auf den jeweils nächsten Schwinger übertragen. Diese Ausbreitung der Energie des ersten Schwingers bezeichnet man als Welle.

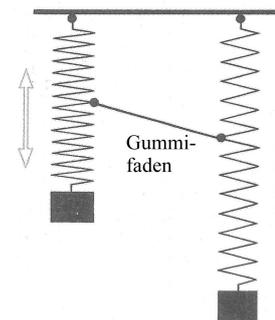


Abb.8: Schwingungsfähiges System

Eine **Welle** entsteht, wenn eine Reihe gekoppelter **schwingungsfähiger Systeme** nacheinander **gleichartige Schwingungen** ausführt.

Die kreisförmigen Wellen an der Wasseroberfläche breiten sich **zweidimensional** aus.

Bei dem gekoppelten Schwingungssystem mit Federschwingern entsteht eine **eindimensionale** Welle. Ebenso erhält man eine eindimensionale Welle wenn man eine lange Schraubenfeder an einem Ende schnell auf- und abbewegt (Abb.9).



Abb.9: Eindimensionale Welle

Schallwellen (Abb.10) bereiten sich **dreidimensional** im Raum aus. Die Luftteilchen übertragen hier die Energie.



Abb.10: Dreidimensionale Welle

Eine **mechanische Welle** ist die Ausbreitung einer mechanischen Schwingung im Raum.

Eine **Welle** überträgt **Energie**, jedoch keinen Stoff.

## 2.2 Arten von Wellen

### 2.2.1 Transversalwellen = Querwellen

Bei einer **Transversal-** oder **Querwelle** bewegen sich die Teilchen quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle.

Transversalwellen haben **Wellenberge** und **Wellentäler** (Abb.11), die periodisch aufeinander folgen. Sie bewegen sich in Ausbreitungsrichtung der Welle.

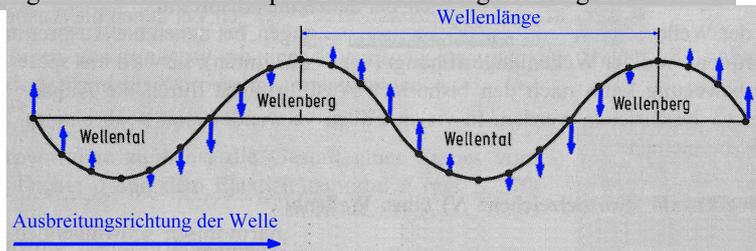


Abb.11: Transversalwelle

#### Beispiele:

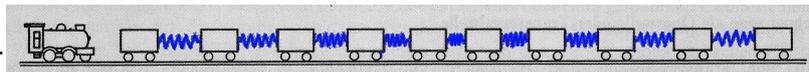
Regentropfen in Wasserpfütze, Fahne die im Wind flattert.

### 2.2.2 Longitudinalwellen = Längswellen

Bei einer **Longitudinal-** oder **Längswelle** schwingen die Teilchen in Ausbreitungsrichtung der Welle.

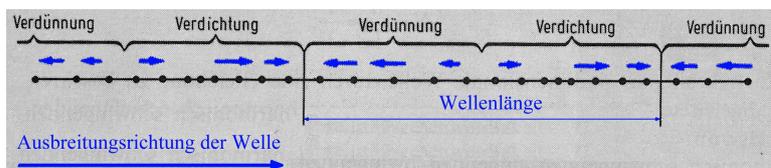
Longitudinalwellen erkennt man beispielsweise auf einem Rangierbahnhof, wenn eine Lokomotive eine Reihe von stehenden Wagen anstößt (Abb.12). Die gesamte Wagenreihe bleibt in Ruhe, der Stoß pflanzt sich von Wagen zu Wagen fort.

Abb.12: Erzeugung einer Longitudinalwelle



Longitudinalwellen haben **Verdichtungen** und **Verdünnungen**, (Abb.13), die periodisch aufeinander folgen. Sie bewegen sich in Ausbreitungsrichtung der Welle.

Abb.13: Longitudinalwelle



#### Beispiele:

Explosionen, Erdbeben

### 2.2.3 Oberflächenwellen

Dünungswellen auf dem Meer bestehen aus langgestreckten Wellentälern und schmalen, spitzen Wellenbergen (Abb.14).

Bei kleinen Wasserwellen, wird die rücktreibende Kraft in erster Linie durch die **Oberflächenspannung** bedingt. Die rücktreibende Kraft wirkt in Richtung der ungestörten und möglichst kleinen Oberfläche.

Bei größeren Wellen überwiegt der Einfluß der **Schwerkraft** des Wassers. Die Wasserteilchen führen dort keine einfache Auf- und Abbewegung, sondern eine Kreisbewegung (Abb.15) aus. Die Teilchen des Wellenberges bewegen sich dabei in Ausbreitungsrichtung, die Teilchen des Wellentales in entgegengesetzter Richtung.



Abb.14: Dünungswellen

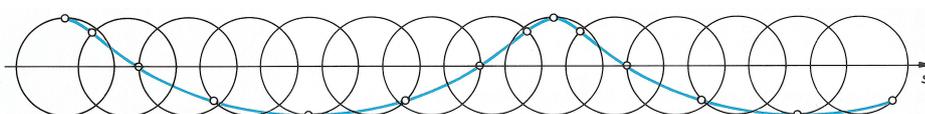


Abb.15: Teilchenbewegung bei großer Oberflächenwelle

## 2.3 Beschreibung einer Welle

### 2.3.1 Physikalische Größen zur Beschreibung einer Welle

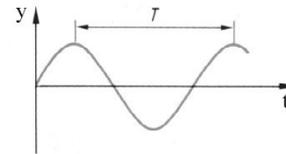
Die Beschreibung mechanischer Wellen erfolgt analog zur Beschreibung von Schwingungen, da jedes Teilchen, das von der Welle erfaßt wird, eine Schwingung ausführt.

Die **Periodendauer** einer Welle ist die Zeit, die jedes Teilchen für eine vollständige Hin- und Herbewegung benötigt.

Die **Frequenz** einer Welle ist die Frequenz, mit der jedes Teilchen seine Schwingung ausführt.

Die Bewegung jedes **einzelnen Teilchens** kann man in einem  $(y,t)$ -Diagramm (Abb.16) darstellen.

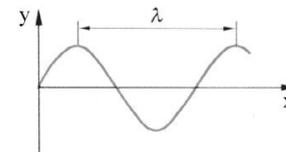
Abb.16: Bewegung eines Teilchens  
– zeitliche Periodizität



Die **Wellenlänge  $\lambda$**  einer Welle ist der Abstand zweier benachbarten Teilchen, die im gleichen Bewegungszustand d.h. in gleicher Phase schwingen.

Das **augenblickliche Bild** einer **Welle** erkennt man in einem  $(y,x)$ -Diagramm (Abb.17).

Abb.17: Darstellung einer Welle  
– räumliche Periodizität



Beide Diagramme haben zwar den gleichen Verlauf, sie beschreiben jedoch andere Sachverhalte! Man erkennt daß eine Welle zeitlich und räumlich periodisch ist.

Allgemein läßt eine Welle sich durch folgende mathematische Beziehung beschreiben:

<b>Wellengleichung</b>	$y = \hat{y} \cdot \sin \left[ 2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$	<p>y: Elongation in m  <math>\hat{y}</math>: Amplitude der Welle = Amplitude der erregenden Schwingung in m  t: Zeit in s  T: Periodendauer in s  x: Abstand vom Wellenzentrum = Laufstrecke der Welle in m  <math>\lambda</math>: Wellenlänge = Abstand zweier benachbarter Teilchen, die in gleicher Phase schwingen in m</p>
------------------------	--	---

Die Wellengleichung beschreibt die Elongation = Auslenkung der Welle als Funktion der Position x und des Zeitpunktes t (Abb.18):

$$y = y(x,t)$$

Abb.18:  $y = y(x,t)$

Betrachten wir ein Teilchen an einem **bestimmten Raumpunkt** d.h. setzen wir in der Gleichung  $x = \text{konstant}$ , erhalten wir eine Gleichung für eine **zeitliche Periodizität** (Abb.16).

Betrachten wir alle Teilchen zu einem **bestimmten Zeitpunkt** d.h. setzen wir in der Gleichung  $t = \text{konstant}$ , erhalten wir eine Gleichung für eine **räumliche Periodizität** (Abb.17).

Betrachten wir zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  die räumliche Periodizität der Welle d.h. stellen wir die Welle jeweils in einem  $(y,x)$ -Diagramm (Abb.19) dar.

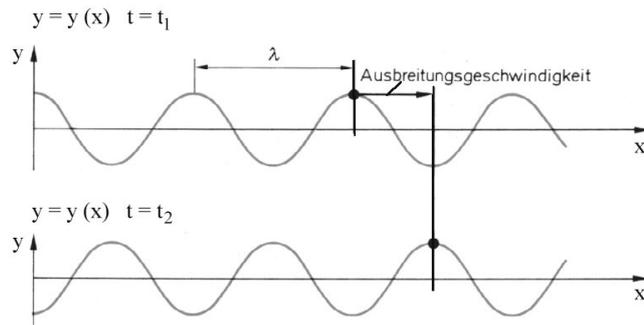


Abb.19:  $y = y(x,t)$  zu zwei Zeitpunkten

Wir erkennen daß die Welle „wandert“, sie breitet sich im Raum aus. Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$**  hängt ab von

- der **Wellenlänge  $\lambda$**  d.h. dem Abstand zwischen zwei Teilchen gleicher Phase und
- der **Frequenz  $f$**  mit der jedes Teilchen der Welle schwingt.

Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$**  einer Welle gibt an, wie schnell sich ein bestimmter Schwingungszustand ausbreitet.

$$c = \lambda \cdot f$$

$c$ : Ausbreitungsgeschwindigkeit  
= Phasengeschwindigkeit in m/s  
 $\lambda$ : Wellenlänge in m  
 $f$ : Frequenz in Hz

### 2.3.2 Aufgaben zur Beschreibung einer Welle

#### Aufgabe 1:

Eine Sirene sendet einen Ton mit zunächst ansteigender und nachfolgend abnehmender Frequenz aus. Die Schallwellen werden an einer Häuserfront reflektiert.

Ein unter der Sirene stehender Beobachter stellt eine zeitliche Verschiebung der Veränderungen um 2,4 s gegenüber dem ausgesandten Signal fest. Wie weit ist die Häuserfront von der Sirene entfernt?

( Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{Luft}}$  ( $15^\circ\text{C}$ , 1,013 bar) = 340 m/s)

#### Aufgabe 2:

a) Bestimme für eine Wasserwelle aus der Abb.20 die Amplitude, die Frequenz, die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

b) Berechne die Elongation eines Teilchens im Abstand von 50 cm nach 1 s bzw. nach 1,5 s.

c) Können die Werte für die Elongation aus den Diagrammen gelesen werden?

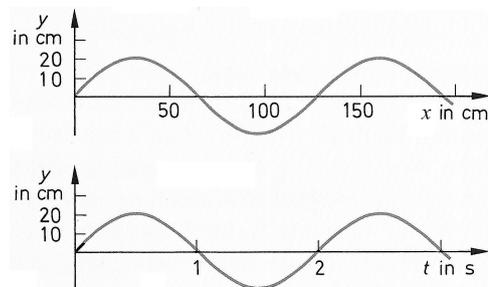


Abb.20: Darstellung einer Wasserwelle

#### Aufgabe 3:

Bei der Ausbreitung einer Schallwelle der Frequenz 2 kHz werden die Wellenlängen in Wasserstoff ( $t = 20^\circ\text{C}$ ), in Luft ( $t = 20^\circ\text{C}$ ) und Mauerwerk gemessen. Sie betragen 0,64 m, 0,17 m und 1,80 m. Wie groß sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Schallwelle?

#### Aufgabe 4:

Der Mensch kann Frequenzen von etwa 20 Hz bis 16 kHz hören. Welchen Wellenlängen entspricht das in Luft? ( $c = 330$  m/s)

#### Aufgabe 5:

Eine Transversalwelle breitet sich in Richtung der positiven  $x$ -Achse mit der Geschwindigkeit  $c = 4$  m/s aus. Sie beginnt zur Zeit  $t = 0$  im Nullpunkt des Koordinatensystems. Die Frequenz beträgt  $f = 0,25$  Hz.

a) Wie groß ist die Wellenlänge?

b) Wann beginnt ein Teilchen bei  $x = 100$  m zu schwingen?

c) Welche Elongation hat dieses Teilchen zur Zeit  $t = 75$  s?



### 3 Überlagerung = Interferenz

#### 3.1 Ungestörte Überlagerung

Fahren zwei Motorboote nebeneinander her (Abb.21), so laufen die inneren Bugwellen aufeinander zu. In einem bestimmten Bereich durchdringen sie sich gegenseitig. Danach verläuft jede der Wellen so weiter, als wenn sie die andere Welle nicht getroffen hätte.

Das gleiche kann man beobachten wenn man zwei Steine in eine Wasserpfütze wirft.

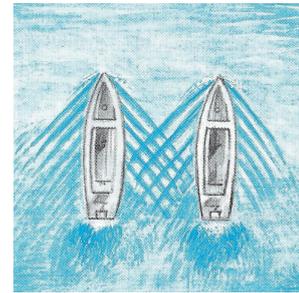


Abb.21: Ungestörte Überlagerung von Wellen

#### **Überlagerungsprinzip = Superpositionsprinzip:**

Treffen zwei mechanische Wellen aufeinander, so überlagern sie sich, ohne sich zu stören.

Selbst wenn sich die beiden Wellen nicht gegenseitig stören, so entsteht doch im Bereich der Überlagerung ein ganz anderes Wellenbild: die **Amplitude** ist an einzelnen Stellen **unterschiedlich groß**. Diese Erscheinung bezeichnet man als **Interferenz**.

**Interferenz** ist die Überlagerung zweier oder mehrerer Wellen an der gleichen Stelle des Raumes. Dabei treten Verstärkung oder Auslöschung der Welle auf.

Interferenzen sind **wellentypische Erscheinungen**. Sie sind besonders gut bei Wasserwellen zu zeigen.

#### 3.2 Überlagerung von Kreiswellen

Um die Vorgänge bei der Überlagerung von Kreiswellen zu untersuchen, werden diesem mit einem Erreger auf einer Wasseroberfläche erzeugt. Hierzu sind an einem Wellenerreger zwei Tupfer befestigt, so daß sich bei der Auf- und Abwärtsbewegung gleichzeitig zwei Systeme von Kreiswellen einstellen.

Die sich ausbreitenden Kreise der Wellensysteme überlagern sich und erzeugen ein charakteristisches „Bild“ (Abb.22):

in manchen Gebieten der Wasseroberfläche tritt eine Verstärkung der Schwingung auf, in anderen eine Abschwächung. Längs einiger Streifen bleibt die Wasseroberfläche fast völlig in Ruhe (Abb.23).

Manche Wasserteilchen schwingen demzufolge stärker, andere schwächer und einige bleiben völlig in Ruhe.

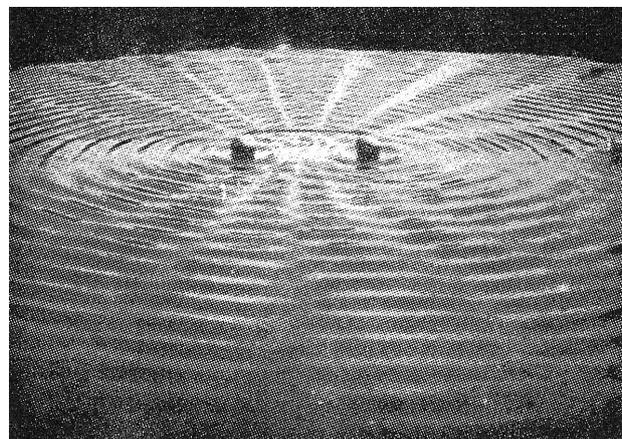


Abb.22: Überlagerung von zwei Kreiswellen



Abb.23: Schwingende und ruhige Gebiete der Wasseroberfläche

**Berechnung der Interferenzerscheinungen:**

Betrachten wir 2 Wellen **gleicher Frequenz, gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude:**

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \hat{y} \cdot \sin\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right] \\ y_2 &= \hat{y} \cdot \sin\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \Delta\varphi\right] \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} y_1 \text{ und } y_2 \text{ unterscheiden sich zum Zeitpunkt } t \text{ am Ort } x \\ \text{um die Phasenverschiebung } \Delta\varphi \end{array}$$

Überlagerungsprinzip:

$$\begin{aligned} y_R &= y_1 + y_2 \\ &= \hat{y} \cdot \sin\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right] + \hat{y} \cdot \sin\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \Delta\varphi\right] \\ y_R &= \hat{y} \cdot \left\langle \sin\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right] + \sin\left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \Delta\varphi\right] \right\rangle \end{aligned} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Trigonometrie:} \\ \sin(\alpha + 2\pi) = \sin \alpha \\ \sin(\alpha + \pi) = -\sin \alpha \end{array} \right\} \begin{array}{l} (2) \\ (3) \end{array}$$

Aus (2) und (1) erhält man:

bei  $\Delta\varphi = k \cdot 2\pi$  mit  $k \in \mathbb{Z}$ : **k: Ganzzahl**

$$y_R = \dots \quad \text{Maximale Verstärkung}$$

Aus (3) und (1) erhält man:

bei  $\Delta\varphi = (2 \cdot k + 1) \cdot \pi$   
 $y_R = \dots$  **Auslöschung**

$$\begin{aligned} \text{Aus } c &= \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ und} \\ \omega &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \text{ nach } \Delta t \text{ aufgelöst und gleichgesetzt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{erhält man: } \frac{\Delta x}{c} &= \frac{\Delta\varphi}{\omega} \\ \Delta\varphi &= \dots \end{aligned} \quad (4)$$

$$(4) \text{ in (1): } y_R = \dots \quad (5)$$

Wie vorhin erhält man für die Ganzzahl  $k \in \mathbb{Z}$

$$\begin{aligned} \text{aus (5) und (1): } \frac{\Delta x \cdot \omega}{c} &= k \cdot 2\pi \\ \Leftrightarrow \Delta x &= \dots \quad \left| \begin{array}{l} \omega = \frac{2\pi}{T} \\ c = \frac{\lambda}{T} \end{array} \right. \\ \Leftrightarrow \Delta x &= \dots \end{aligned}$$

$\Delta x = k \cdot \lambda$  **Maximale Verstärkung**

Analog aus (5) und (2):  $\Delta x = (2 \cdot k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$  **Auslöschung**



Unter dem **Gangunterschied** zweier Wellen gleicher Wellenlänge verstehen wir eine Strecke, um die man die eine Welle verschieben muß, damit gleichartige Schwingungszustände (z.B. die Stellen maximaler positiver Elongation) der beiden Wellen zur Deckung kommen.

### Zeichnerische Konstruktion der Interferenzerscheinungen:

Nachfolgend sind die Wellensysteme der beiden Erreger (Abb.24) dargestellt:

- die Wellenberge sind durch dick ausgezogene Kreise (dunkelgrün bzw. dunkelgelb) dargestellt,
- die Wellentäler sind durch dünne ausgezogene Kreise (hellgrün bzw. hellgelb) dargestellt.

### Aufgabe:

Zeichne die Punkte ein, an denen Auslöschung oder maximale Verstärkung stattfindet. Verbinde diese Punkte durch Kurven.

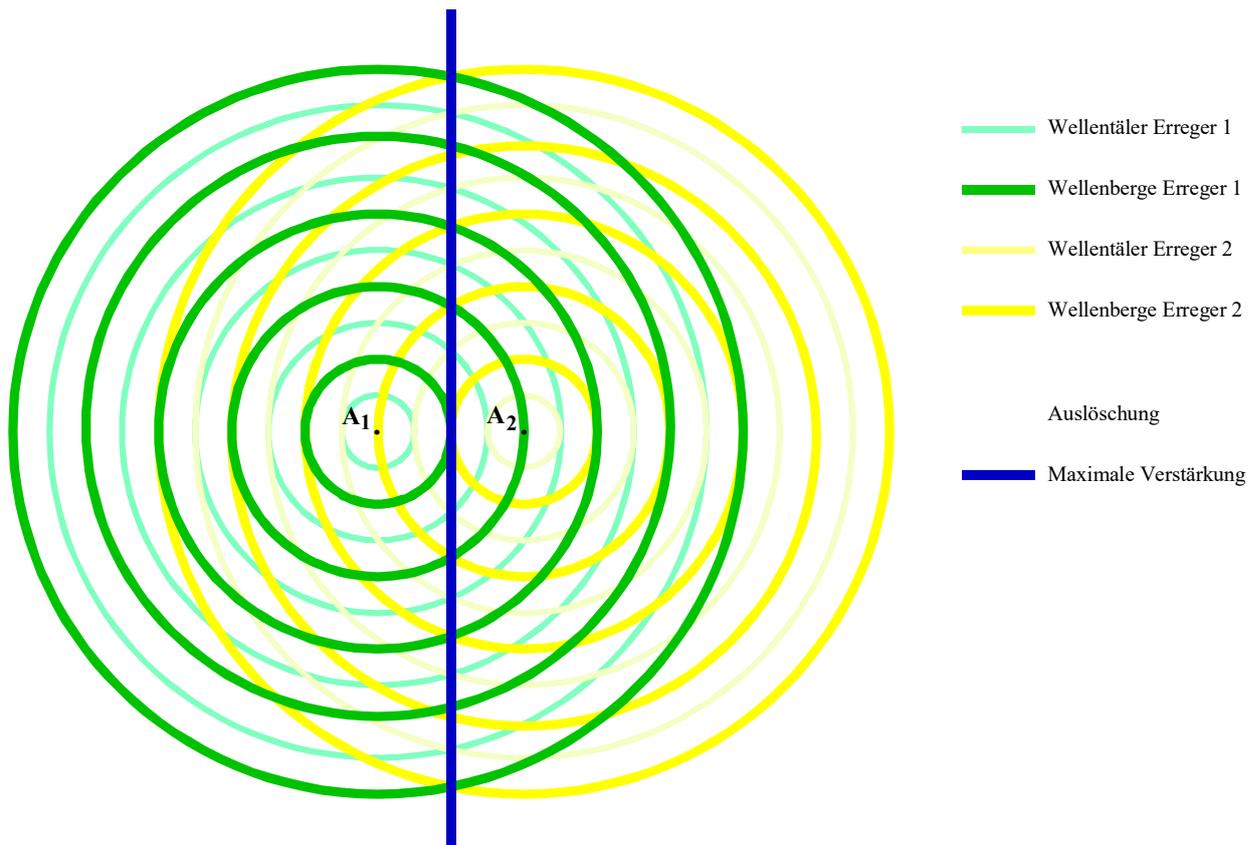


Abb.24: Wellensystem von zwei Erregern

Entsprechend den Berechnungen auf der vorhergehenden Seite tritt eine **maximale Verstärkung** an allen Punkten der Wasseroberfläche ein, an denen sich zwei Wellen mit einem Gangunterschied  $k \cdot \lambda$  überlagern.

Das ist unter anderem überall dort der Fall, wo sich zwei dick gezeichnete oder zwei dünn gezeichnete Kreise schneiden. Diese Punkte maximaler Verstärkung sind durch dicke (z.B. blaue) Kurven dargestellt.

Die **maximale Verstärkung** findet beispielsweise an allen Punkten statt, an denen ein **Wellenberg** auf einen **Wellenberg** trifft oder ein **Wellental** auf ein **Wellental**.

Maximale Verstärkung tritt bei allen Punkten der Mittelsenkrechten der Strecke  $A_1A_2$  ein. Alle anderen Kurven maximaler Verstärkung sind Hyperbeln, die als Brennpunkte die Erregerzentren haben.

**Auslöschung** tritt an allen Punkten der Wasseroberfläche ein, an denen sich zwei Wellen mit einem Gangunterschied  $(2 \cdot k + 1) \cdot \lambda / 2$  überlagern.

Das ist unter anderem überall dort der Fall, wo sich ein dick gezeichneter und ein dünn gezeichneter Kreis schneiden. Diese Punkte maximaler Verstärkung sind durch dünne (z.B. blaue) Kurven dargestellt.

Die Auslöschung findet beispielsweise an allen Punkten statt, an denen ein **Wellenberg** auf ein **Wellental** trifft.

### 3.3 Prinzip von Huygens

Um die Vorgänge bei der Wellenausbreitung erklären zu können, entwickelte Christiaan HUYGENS <sup>1)</sup> ein Modell der Wellenausbreitung.

Sein Prinzip wird anhand von zwei Versuchen veranschaulicht.

#### Versuch 1:

In einer Wellenwanne werden Wellen mit geradlinigen Wellenfronten erzeugt, die auf ein langgestrecktes Hindernis mit einer spaltförmigen Öffnung (Abb.25) auftreffen.

Man erkennt, daß sich hinter der Öffnung eine halbkreisförmige Welle ausbildet. Die **Öffnung** ist der **Ausgangspunkt** dieser **Welle**.

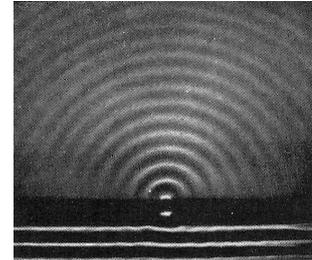


Abb.25: Wellenbildung an spaltförmiger Öffnung

#### Versuch 2:

Bei einem ähnlichen Versuchsaufbau wird ein Hindernis mit vielen kleinen Öffnungen verwendet, die in gleichen Abständen (Abb.26) angeordnet sind.

Hinter jeder Öffnung bilden sich wiederum halbkreisförmige Wellen aus. Diese überlagern sich derart, daß **in großer Entfernung** vom Hindernis erneut eine **geradlinige Wellenfront** auftritt.

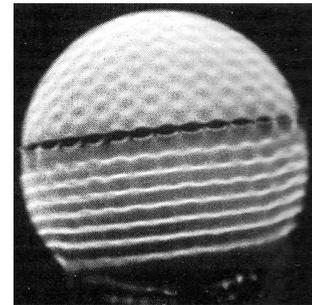


Abb.26: Bildung einer Wellenfront

Die Erklärung beider Vorgänge liefert nachfolgendes Modell der Wellenausbreitung:

#### Prinzip von Huygens:

Jeder von einer Wellenbewegung erfaßte Punkt eines Mediums wird selbst zum Ausgangspunkt einer neuen Welle, der sogenannten **Elementarwelle**, die sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie die ursprüngliche Welle ausbreitet.

Die **neue Wellenfront** entsteht als **Einhüllende** aller Elementarwellen.

Anmerkung: die Elementarwelle ist eine Modellvorstellung. Man kann nur Kreiswellen mit einem ausgedehnten Zentrum erzeugen und sehen.

Mit Hilfe des Prinzips von Huygens kann man die Vorgänge bei den beiden Versuchen schematisch darstellen und deuten:

zu Versuch 1: die Wasserteilchen in der Öffnung werden durch die ankommende Welle zum Schwingen angeregt. Sie sind Ausgangspunkt von Elementarwellen (Abb.27).

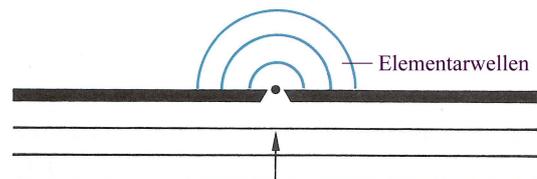


Abb.27: Bildung von Elementarwellen

zu Versuch 2: die Elementarwellen bilden hinter den Öffnungen halbkreisförmige Wellen. Diese überlagern sich. In größerem Abstand entsteht als Einhüllende (Abb.28) eine geradlinige Wellenfront.

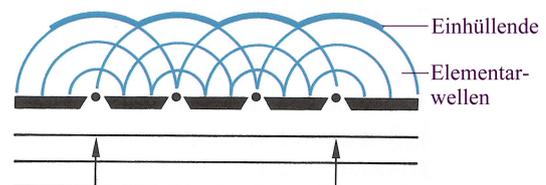


Abb.28: Bildung einer Einhüllenden

<sup>1)</sup> Christiaan HUYGENS (1629-1695): holländischer Physiker, Mathematiker und Astronom, entwickelte Wellenmodell. (Traité de la Lumière (1690))



## 4 Ausbreitung von Wellen

### 4.1 Einführung

Bei der **Ausbreitung** mechanischer Wellen kann man mehrere **charakteristische Erscheinungen** feststellen.

#### 4.1.1 Geradlinige Ausbreitung

Bei hohen Geschwindigkeiten erzeugt ein Motorboot starke Bugwellen (Abb.29). Die geradlinigen Wellenfronten bewegen sich in der Ausbreitungsrichtung der jeweiligen Welle. Bei gleichbleibender Wassertiefe (Ausbreitungsgeschwindigkeit) breiten sich die Wellen geradlinig und senkrecht zu den Wellenfronten aus.

Das gilt auch für Schallwellen. Eulen greifen ihre Beute im Dunkeln. Sie peilen eine piepsende oder raschelnde Maus mit den Ohren an. Da sich die Schallwellen geradlinig ausbreiten, können sie die Maus fangen.

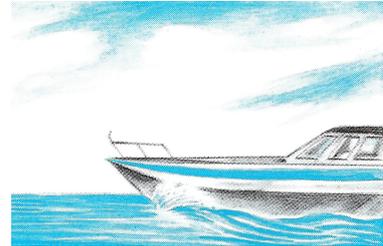


Abb.29: Geradlinige Ausbreitung von Wasserwellen

Mechanische Wellen breiten sich **geradlinig** aus.

#### 4.1.2 Reflexion

Fährt ein Schiff in einem Kanal, so treffen seine Bugwellen auf die Uferbefestigungen auf. Dort werden die Wasserwellen reflektiert (Abb.30).

Manchmal hört man die letzten Silben eines Wortes, das man vor einer Häuserwand, einem Berg oder einem Wald laut ruft. Die Schallwellen werden als Echo reflektiert.

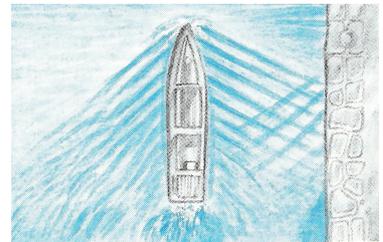


Abb.30: Reflexion von Wasserwellen

Tritt eine mechanische Welle auf ein **Hindernis**, so wird sie **reflektiert**.

#### 4.1.3 Brechung

Treffen Wasserwellen schräg auf ein Gebiet, in dem sich flaches Wasser befindet, so ändert sich die Richtung der Wellenfronten und damit die Ausbreitungsrichtung der Wellen (Abb.31).

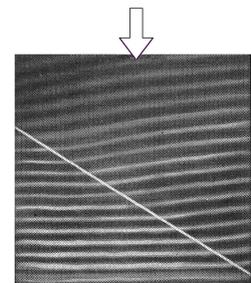


Abb.31: Brechung von Wasserwellen

Trifft eine mechanische Welle auf eine **Grenzschicht**, an der die Ausbreitungsgeschwindigkeit ändert, so ändert sich ihre Ausbreitungsrichtung. Die Welle wird **gebrochen**.

#### 4.1.4 Beugung

Molen vor Hafenbecken werden so angelegt, daß die Dünung des Meeres nicht direkt eintreten kann. Dadurch werden Schäden an den Hafenanlagen und zu starke Bewegungen der vor Anker liegenden Schiffe vermieden. Trotzdem gelangen die Dünungswellen teilweise in das Hafenbecken hinein. Sie werden an der Hafentmole "herumgebogen" (Abb.32). Diese Erscheinung nennt man Beugung.

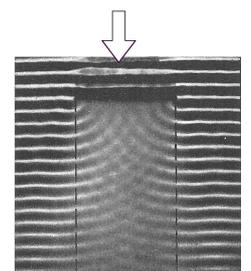


Abb.32: Beugung von Wasserwellen an einem Hindernis

Auch Wellen die teilweise zwischen zwei Wellenbrechern hindurch kommen, werden „herumgebogen“ und erzeugen in der abgedeckten Wasseroberfläche hinter den Brechern eine Wasserbewegung (Abb.33).

Ebenso hört man den Schall von Autos in einer Fußgängerzone, ohne die Autos zu sehen. Die Schallwellen werden an den Häusern, die am Eingang der Fußgängerzone stehen, gebeugt.

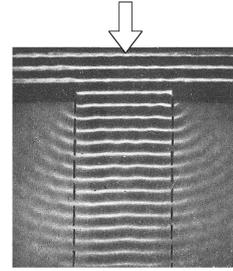


Abb.33: Beugung von Wasserwellen an einem Spalt

Trifft eine mechanische Welle auf ein Hindernis oder einen Spalt, so wird sie **gebeugt**.

## 4.2 Reflexionsgesetz

Betrachten wir eine ebene Welle  $P_1Q_1$ , die schräg auf die Grenzfläche der beiden Medien 1 und 2 fällt (Abb.34). Sie wird durch die beiden parallelen Strahlen  $s_1$  und  $s_3$  dargestellt.

Abb.34: Reflexion einer Welle

Zum Zeitpunkt  $t_1$  trifft der Strahl  $s_1$  auf  $P_1$ , der Strahl  $s_3$  ist bei  $Q_1$ ,  
zum Zeitpunkt  $t_3 > t_1$  trifft Strahl  $s_3$  trifft auf  $P_3$ .

Zum Zeitpunkt  $t_3$  hat sich (nach Huygens) von  $P_1$  aus eine neue kreisförmige Elementarwelle um  $P_1$  ausgebreitet mit Radius  $P_1Q_1'$ .

Aufgrund des Zeitintervalls  $\Delta t = t_3 - t_1$  gilt für den Radius:  $P_1Q_1' = Q_1P_3$

Die neue Wellenfront ergibt sich als gemeinsame Tangente aller Elementarwellen, es ist zum Zeitpunkt  $t_3$  die Verbindungslinie  $Q_1'P_3$ .

Betrachten wir die Dreiecke  $P_1Q_1P_3$  und  $P_1Q_1'P_3$  :

die Länge  $P_1P_3$  beider Dreiecke ist gleich,

da  $Q_1P_3 = Q_1'P_1$  und Winkel( $P_1Q_1P_3$ ) = Winkel( $P_1Q_1'P_3$ ) =  $90^\circ$  muß auch gelten:

$$\text{Winkel}(Q_1P_3P_1) = \text{Winkel}(Q_1'P_3P_1)$$

und somit  $\alpha = \beta$

### Reflexionsgesetz:

Bei der **Reflexion** einer ebenen Welle an einer ebenen Grenzfläche sind der **Einfallswinkel** und **Reflektionswinkel gleich groß**

$$\alpha = \beta$$

$\alpha$ : Einfallswinkel in  $^\circ$   
 $\beta$ : Reflektionswinkel in  $^\circ$



### 4.3 Brechungsgesetz

Betrachten wir eine ebene Welle  $P_1Q_1$ , die schräg auf die ebene Grenzfläche der beiden Medien 1 und 2 fällt und in das 2. Medium eindringt (Abb.35). Sie wird durch die zwei parallele Strahlen  $s_1$  und  $s_3$  dargestellt.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den Medien 1 bzw. 2 sollen  $c_1$  bzw.  $c_2$  betragen.

*Abb.35: Brechung einer Welle*

Zum Zeitpunkt  $t_1$  trifft Strahl  $s_1$  mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_1$  auf  $P_1$ ,  
zum Zeitpunkt  $t_3 > t_1$  trifft Strahl  $s_3$  mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_1$  auf  $P_3$ .

Zum Zeitpunkt  $t_3$  hat sich (nach Huygens) von  $P_1$  aus eine neue kreisförmige Elementarwelle mit Radius  $P_1Q_1'$  ausgebreitet.

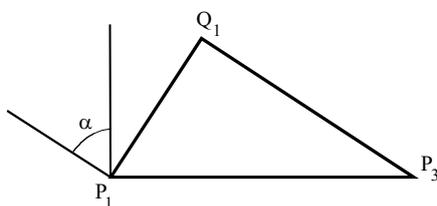
Die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Elementarwelle ist  $c_2$ . Der Strahl  $s_1$  hat die Strecke  $P_1Q_1'$  zurückgelegt. Die neue Wellenfront ergibt sich als gemeinsame Tangente aller Elementarwellen, es ist zum Zeitpunkt  $t_3$  die Verbindungslinie  $Q_1'P_3$ .

Für gleiche Zeitintervalle gilt:  $\frac{\text{Weg}}{\text{Geschwindigkeit}} = \text{konstant (= } \Delta t)$

Für  $\Delta t = t_3 - t_1$  gilt daher:  $\frac{Q_1P_3}{c_1} = \frac{P_1Q_1'}{c_2}$

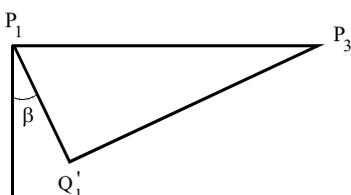
und somit  $\frac{Q_1P_3}{P_1Q_1'} = \frac{c_1}{c_2}$  (I)

Betrachten wir die geometrischen Verhältnisse für die Welle im Medium 1 (Abb.36) und 2 (Abb.37):



Man erkennt:

*Abb.36: Welle im Medium 1*



Analog erhält man:

*Abb.37: Welle im Medium 2*

Aus (2) und (3) folgt:

$$\text{bzw.} \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{Q_1 P_3}{P_1 Q_1'} \quad (4)$$

Unter Berücksichtigung von (1) und (4) erhält man schlußendlich:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{Q_1 P_3}{P_1 Q_1'} = \frac{c_1}{c_2}$

### **Brechungsgesetz:**

Wird eine ebene Welle an einer ebenen Grenzfläche zweier Medien **gebrochen**, ist der **Quotient aus dem Sinus** des Einfallswinkel und dem Sinus des Brechungswinkels gleich dem **Quotienten aus den Ausbreitungsgeschwindigkeiten** der Welle in den beiden Medien.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

$\alpha$ : Einfallswinkel in  $^\circ$

$\beta$ : Brechungswinkel in  $^\circ$

$c_1$ : Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium 1 in m/s

$c_2$ : Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium 2 in m/s

### **Anmerkung:**

Die Frequenz  $f$  der Welle bleibt unverändert.

$$\text{Somit gilt:} \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

## 5 Stehende Wellen

### 5.1 Entstehung einer stehenden Welle

#### 5.1.1 Überlagerung von Wellen

An den beiden gegenüberliegenden Enden eines Wellenkanals werden Wellen mit gleicher Frequenz erzeugt (Abb.38).

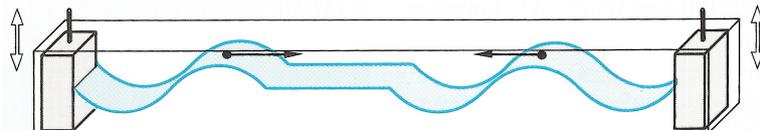


Abb.38: Überlagerung von Wellen

Beim Überlagern entstehen Bereiche, in denen sich das Wasser stark auf- und abbewegt, und solche, in denen das Wasser weitgehend ruht.

Erstere nennt man **Schwingungsbäuche**, letztere **Schwingungsknoten**.

In Abb.39 ist der Überlagerungsvorgang in aufeinander folgenden Phasen dargestellt.

Man erkennt, daß im Bereich der **Schwingungsbäuche** zeitlich **nacheinander alle Möglichkeiten der Überlagerung** zweier Wellen auftreten, von der gegenseitigen **Auslöschung** (bei  $t = 0$ ,  $t = T/2$ ,  $t = T \dots$ ) bis zur vollständigen **Verstärkung** ( $t = T/4$ ,  $t = 3 \cdot T/4 \dots$ ).

Im Bereich der **Knoten** tritt demgegenüber **zu jedem Zeitpunkt Auslöschung** auf, da die **Elongation beider** Wellen entweder **null** ist ( $t = T/4$ ,  $t = 3 \cdot T/4 \dots$ ) oder die Elongation **gleichen Betrag**, aber **entgegengesetzt Vorzeichen** haben.

Eine solche Welle, die ortsfeste Schwingungsknoten und -bäuche besitzt, nennt man **stehende Welle**.

Beiderseits eines Knotens schwingen die Teilchen jeweils in entgegengesetzter Richtung.

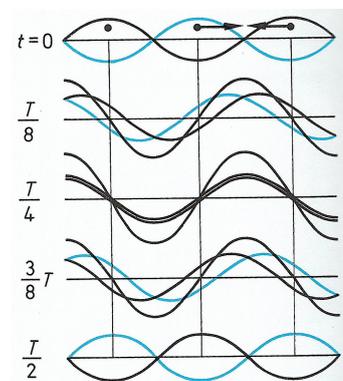


Abb.39: Entstehung einer stehenden Welle



Eine **stehende Welle tritt auf**, wenn zwei Wellen **gleicher Amplitude** und **Wellenlänge** aufeinander treffen, die sich in **entgegengesetzter Richtung** ausbreiten.

Sie hat **ortsfeste Schwingungsknoten** und **Schwingungsbäuche**.

Der **Abstand** zweier benachbarter **Knoten** beträgt eine **halbe Wellenlänge** ( $\lambda/2$ ).

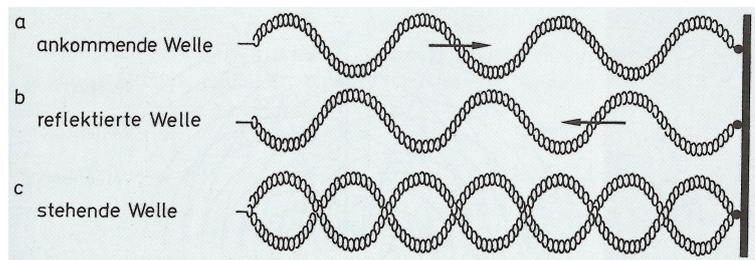
### Anmerkungen:

- Die Wellenlänge der stehenden Welle stimmt mit derjenigen der Ausgangswellen überein.
- Beiderseits eines Knotens schwingen die Teilchen jeweils in entgegengesetzter Richtung.
- Alle Teilchen einer stehenden Welle gehen gleichzeitig durch die Gleichgewichtslage und erreichen gleichzeitig ihren größten Ausschlag.
- Stehenden Welle sind von Bedeutung, weil mit ihrer Hilfe Messungen von Wellenlängen durchgeführt werden können.

### 5.1.2 Reflexion von Wellen

Eine stehende Welle läßt sich auch dadurch erzeugen, daß man eine Welle auf ein Hindernis auflaufen läßt. Sie wird reflektiert und läuft der ankommenden Welle entgegen (Abb.40).

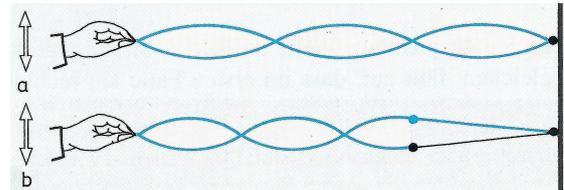
Abb.40: Entstehung einer stehenden Welle durch Reflexion



Solche Reflexionen können bei Stäben, Seilen, Luftsäulen, Saiten oder in Flüssigkeiten auftreten. Die Schwingungen einer stehenden Welle findet man bei vielen Musikinstrumenten.

Die **Form** der stehenden Welle, die durch Reflexion entsteht, hängt von den „Enden“ der Welle (Abb.41) ab:

Abb.41: Reflexion am festen Ende (a) und am offenen Ende (b)



Eine **stehende Welle** lässt sich dadurch **erzeugen**, daß eine Welle an einem **Hindernis reflektiert** wird.

Wird eine Welle an einem **festen Ende** reflektiert, so entsteht bei der Überlagerung von ankommender und reflektierender Welle an dieser Stelle ein **Schwingungsknoten**.

Bei der Reflexion am **losen Ende** entsteht dort ein **Schwingungsbauch**.

## 5.2 Grund- und Oberschwingung

Bei bestimmten Wellenlängen kommt es zu stehenden (oder stationären) Wellen. Betrachten wir mehrere stehenden Wellen, die an einem Seil entstehen können, das zwischen zwei Wänden eingespannt ist (Abb.42).

### Aufgabe:

- Bestimme zu jeder Welle den Abstand  $l$  zwischen den Wänden als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$ .
- Wie verhalten sich die Wellenlänge  $\lambda$ , die Frequenz  $f$  und die Amplitude  $y$  der einzelnen stehenden Wellen zueinander?

Bezeichnung:	<u>Lösung:</u> Abstand:	$\lambda, f$ und $y$ :

Abb.42: Grund- und Oberschwingungen

Allgemein gilt als Zusammenhang zwischen dem Abstand  $l$  und der Wellenlänge  $\lambda$ :

Bei stehenden (stationären) Wellen an einem Seil, das zwischen zwei Wänden eingespannt ist, ist der Wandabstand ein Vielfaches der halben Wellenlänge.



- $l$ : Abstand in m
- $k$ : Gangzahl ohne Einheit  
 $k = 1, 2, \dots$
- $\lambda$ : Wellenlänge in m

### 5.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz

#### 5.3.1 Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

**Aufgabe:**

Berechne für die Aufgabe aus vorhergehendem Abschnitt die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ .

- Gegeben: Abstand  $l = 1$  m  
Frequenz der Grundschiwingung:  $f = 50$  Hz
- Gesucht: Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$

**Lösung:**

$l = k \cdot \lambda / 2$  (1)  
 $c = \lambda \cdot f$  (2) (siehe Seite E6)

Schwiwingung:	Gangzahl $k$ ohne E.	Frequenz $f$ in Hz (aus Abb.42)	Wellenlänge $\lambda$ in m ( $\lambda = 2 \cdot l/k$ )	Ausbreitungsgeschwindigkeit $c$ in m/s ( $c = \lambda \cdot f$ )
Grundschiwingung				
1. Oberschiwingung				
2. Oberschiwingung				

Allgemein gilt demzufolge:



Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$**  hängt vom **Ausbreitungsmedium** (Stoff) und der **Temperatur  $T$**  ab.

$c = c(T, \text{Medium})$



### 5.3.2 Berechnung der Frequenz

#### Aufgabe:

Berechne für die Aufgabe aus vorhergehendem Abschnitt die Frequenz  $f$  als Funktion der Ausbreitungsgeschwindigkeit:

#### Lösung:

Aus (2):

In (1):

Somit folgt:

$$f = k \cdot \frac{c}{2 \cdot l}$$

Frequenz eines Seiles, das zwischen zwei Wänden eingespannt ist.

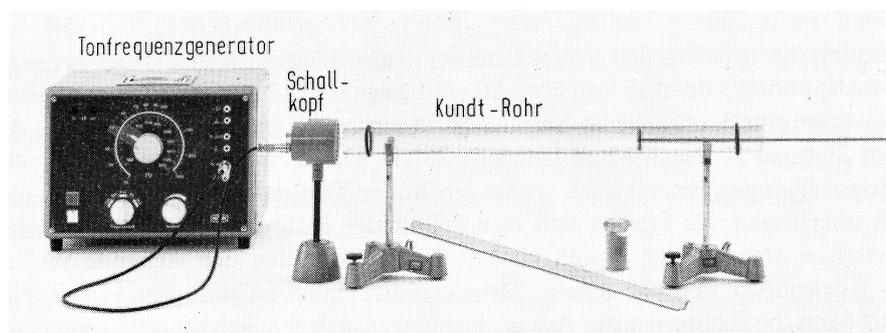
## 6 Schallwellen (Akkustik)

### 6.1 Stehende Wellen (Kundtsche Röhre)

Mit Hilfe des Kundt-Rohres <sup>1)</sup> (Abb.43) werden stehende Schallwellen sichtbar gemacht.

Im Rohr erzeugte stehende Wellen werden durch Korkmehl sichtbar gemacht. Dieses bildet sogenannte Kundt-Staubfiguren: an den Wellenbäuchen bewegt es sich, an den Wellenknoten bleibt es in Ruhe.

Abb.42: Versuchsaufbau Kundtsche Röhre



Durch Messen des Abstandes zweier benachbarten Knoten kann man die Wellenlänge der Schwingungen bestimmen. Mit Hilfe der (am Tonfrequenzgenerator) eingestellten Frequenz errechnet sich daraus die Schallgeschwindigkeit des Gases im Rohr.

Die Schallgeschwindigkeit in festen Stoffen kann ebenfalls gemessen werden, da der ins Rohr eingespannte Stab eine Längsschwingung ausführt.

Aus den selbst durchgeführten Versuchen (siehe TP Kundtsche Röhre) und aus Literaturrecherchen lassen sich die in nachfolgender Tabelle (Abb.44) aufgeführten Schallgeschwindigkeiten zusammentragen.

Schallgeschwindigkeit $c$ in m/s					
Feste Stoffe (bei 20°C):		Flüssigkeiten (bei 20°C):		Gase (bei 0°C und 101,3 kPa):	
Aluminium	5110	Ethylalkohol	1170	Luft	331,6
Eisen	5180	Glycerin	1923	Luft 15°C	340
Gummi	54	Meerwasser	1531	Methan	430
Kork	500	Wasser, dest.	0°C 1403	Sauerstoff	315
Kupfer	3800		20°C 1483	Stadtgas	450
Pyrexglas	5170		40°C 1529	Stickstoff	334
Ziegel	3650		60°C 1551	Wasserstoff	1286

Abb.44: Schallgeschwindigkeit verschiedener Stoffe

1) August Adolph Eduard Eberhard KUNDT (1839-1894): deutscher Physiker, bewies Einatomigkeit des Quecksilberdampfes stellte als erster Metallspiegel durch Kathodenbestäubung her



## 6.2 Schwebung

Wenn zwei Schallquellen harmonische Wellen gleicher Amplitude aussenden, die sich nur geringfügig in ihrer Frequenz unterscheiden, erklingen nicht zwei getrennte Töne, sondern ein einziger Ton. Dieser schwankt regelmäßig in seiner Lautstärke. Man spricht von **Schwebung**.

Die Summenschwingung läßt sich wie folgt berechnen:

$$y_R = 2 \cdot y_{\max} \cdot \cos[\pi(f_1 - f_2)t] \cdot \sin[\pi(f_1 + f_2)t].$$

Der Schwingungsverlauf ist in Abb. 45 dargestellt.

Schwebung läßt sich beispielsweise bei einer Orgel mit vielen Pfeifen nicht immer ganz verhindern, der Klang geht dann etwas „unter die Haut“. Bei großen Orchestern tritt der Effekt auf, die Lautstärke scheint dem Zuhörer dauernd an- und abschwelend. Musiker stimmen beispielsweise Klaviere mit Hilfe von Stimmgabeln.

Bei Metallsuchgeräten wird die Frequenz einer der beiden Schwingungskreise durch ein Metall verändert.

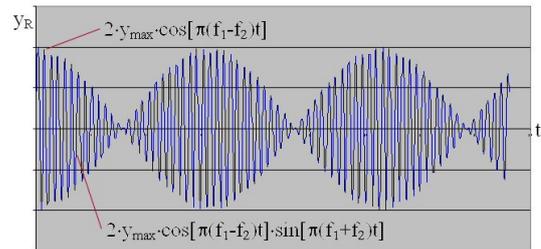


Abb.45: Schwebung

## 6.3 Aus Wissenschaft und Technik

### Stehende Schallwellen in Orgelpfeifen

Das auffälligste an einer Orgel sind die Orgelpfeifen (Abb.46). Die langen sind gut sichtbar angeordnet. Von dieser großen Front können sie die tiefen Töne besonders gut ausbreiten. Die kleinen Pfeifen, die oft nur wenige Zentimeter lang sind, sind im hinteren Teil der Orgel angebracht. In ihnen werden die hohen Töne erzeugt. Da die Schwingungsenergie quadratisch mit der Frequenz zunimmt, sind auch die Töne der versteckten Orgelpfeifen unter sonst gleichen Bedingungen gut zu hören.

Es finden Pfeifen verschiedener Bauart Verwendung, sowohl oben offene als auch geschlossene („gedackte“) Pfeifen.

Bei einer Lippenpfeife strömt die Luft von unten ein. Der Luftstrahl, der in der Kernspalte entsteht, erzeugt Wirbel. Diese Wirbel regen die Luftsäule im oberen Teil der Orgelpfeife zum Schwingen mit deren Eigenfrequenz an. Es entsteht eine stehende Welle. In der schmalen, langen Pfeife bildet sich diese Welle nur in der Längsrichtung aus. Sie besitzt am oberen und am unteren Ende jeweils einen Schwingungsbauch.

Außer der Grundschwingung können noch harmonische Oberschwingungen auftreten. Diese Grund- und Oberschwingungen sind im Zusammenwirken immer wohlklingend.

Orgeln wurden in Form von Wasserorgeln schon 250 v. Chr. erwähnt. Das Wasser wurde benutzt, um die Luft in die Orgelpfeifen zu drücken.



Abb.46: Orgelpfeifen

## 7 Aufgaben zu stehenden Wellen

### Aufgabe 1:

Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt 340 m/s. Wie lang muß eine beidseitig offene Orgelpfeife sein, damit die 1. Oberfrequenz 880 Hz erzeugt? (Erg.: 0,386 m)

### Aufgabe 2:

Welche Wellenlänge haben die Grundschwingung und die 2. Oberschwingung in einer 59cm langen Querflöte, die einseitig geöffnet ist? (Erg.: 236 cm; 47,2 cm)

### Aufgabe 3:

Wenn man geschickt über die Öffnung einer leeren Wasserflasche bläst erzeugt man einen Ton. Wie verändert sich der Ton, wenn die Flasche mit Wasserstoff gefüllt ist? (Erg.:  $f_{H_2} \approx 4 \cdot f_{Luft}$ )

## 8 Optik (Licht)

### 8.1 Modellvorstellungen über die Ausbreitung des Lichtes

Anfang des 17. Jahrhunderts hat man versucht vom Licht eine anschauliche Modellvorstellung zu gewinnen. Diese sollte gestatten die beobachteten Erscheinungen und Gesetzmässigkeiten in möglichst einfacher Weise zu beschreiben und zu verstehen.

- Eine erste wichtige Erkenntnis auf dem Wege der Erforschung des Lichtes war die Feststellung, daß das Licht eine bestimmte, messbare Zeit braucht, um von dem Ort seiner Entstehung zum Ort seiner Wahrnehmung zu gelangen.  
Licht ist ein Energiestrom der sich mit einer **messbaren Geschwindigkeit** ausbreitet.
- Anschließend stellte sich die Frage nach dem „Wesen“ des Lichtes. „Was ist Licht?“ Es gibt zwei Möglichkeiten, durch die sich ein Energiestrom ausbreiten kann:  
durch **Wellen** oder durch **Teilchen**, die vom Ort des Ereignisses ausgehen.

Demzufolge können also für das Licht grundsätzlich zwei verschiedene Modellvorstellungen entwickelt werden:

- Das **Korpuskelmodell** des Lichtes wurde von NEWTON <sup>1)</sup> entwickelt. Danach gehen von der Lichtquelle kleine, substantielle Partikeln aus, die sich mit Lichtgeschwindigkeit nach allen Richtungen geradlinig ausbreiten.
- Das **Wellenmodell** des Lichtes stammt von HUYGENS. Dieser stellte sich die Lichterscheinungen ähnlich wie die Schallvorgänge vor. Was sich von einer tönenden Glocke aus in der Luft ausbreitet, sind nicht die einzelnen Luftteilchen, sondern Wellen, die hier aus Verdichtungen und Verdünnungen bestehen; es ist also nicht die Materie, die sich im Raume ausbreitet, sondern ein bestimmter Zustand der Materie. Jede mechanische Wellenbewegung erfordert aber einen Träger, d.h. es müssen Teilchen vorhanden sein, die die sich ausbreitenden Schwingungen ausführen. Da das Licht sich aber auch durch den leeren Weltraum ausbreitet, stellte sich HUYGENS einen feinen, alles durchdringenden Stoff, den *Lichtäther* vor, der als transportierendes Medium wirkt.

Wesentliche Merkmale von Teilchen bzw. Wellen sind in Abb.46 festgehalten.

Teilchen	Wellen
- Befinden sich zu jedem Zeitpunkt an einem bestimmten Ort und haben eine bestimmte Geschwindigkeit	- beruhen auf räumlichen und zeitlich periodischen Veränderungen physikalischer Größen
- Bewegen sich auf bestimmten Bahnen	- sind räumlich ausgedehnt
- bei Wechselwirkungen gelten die Erhaltungssätze für Energie und Impuls	- an Hindernissen kommt es zu Beugung und Reflexion
	- Interferenz kann zu Verstärkung oder Auslöschung führen

Abb.46: Vergleich Teilchen-/Welleneigenschaften

Durch keine der beiden Modellvorstellungen werden sämtliche Eigenschaften des Lichtes vollständig beschrieben. Ein Teil der Erscheinungen wird durch das Wellenbild und ein anderer Teil durch das Korpuskelbild richtig wiedergegeben.

Zu vollständiger Erfassung der Eigenschaften des Lichtes müssen **beide Modellvorstellungen nebeneinander** benutzen werden. Man spricht vom **Dualismus des Lichtes**.

Licht wurde bereits zu frühen Zeiten ebenso wie heute noch in Form von Strahlen dargestellt. Die Strahleneigenschaften des Lichtes sind aus der Optik bekannt (geradliniges Ausbreiten, Reflexion an ebenen Flächen). Sie lassen sich, ähnlich wie Wasserwellen, mit Hilfe eines Wellenmodells erklären. Sie lassen sich aber auch durch das Korpuskelmodell erklären (kleine Partikel reflektieren wie Billardkugeln an ebenen Wänden).

**Wellentypische Eigenschaften** sind Beugung und Interferenz, die wir beim **Licht** ebenfalls vorfinden.

<sup>1)</sup> Sir Isaac NEWTON (1643-1727):  
englischer Physiker



## 8.2 Abweichendes Verhalten von der Strahlenoptik

Interferenzerscheinungen beim Licht sind öfters zu sehen. Beispielsweise sind farbige Ringe auf der Asphaltstraße zu finden. Sie werden durch dünne Ölschichten verursacht.

Auch Seifenblasen (Abb.47) zeigen wechselnde Farben. Hier ist eine sehr dünne Schicht Seifenwasser die Ursache.



Abb.47: Farbige Bereiche bei Seifenblasen

### Versuch:

In den Weg eines durch einen sehr schmalen Spalt (Abb.48 (a)) begrenzten, fast parallelen Lichtbündels (Laserlicht) bringen wir einen Draht (b) (Durchmesser in der Größenordnung 1 mm),

Nach der Strahlenoptik müsste der Lichtbündel von dem Draht ein scharfes Schattenbild erzeugen.

Auf einem Schirm (c) beobachten wir innerhalb des geometrischen Schattenraumes in der Längsachse des Schattens einen hellen Streifen (Abb.49). Abwechselnd schliessen sich -je nach Drahtdicke- mehr oder weniger eng nebeneinander liegende, parallele, dunkle und helle Streifen im Wechsel an. Ähnlich aussehende Streifen, allerdings schwächer, treten außerhalb des Schattens auf.

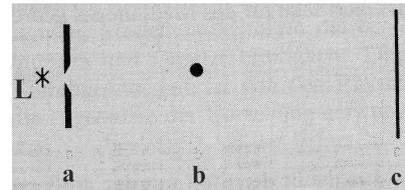


Abb.48: Anordnung zur Beugung am Draht

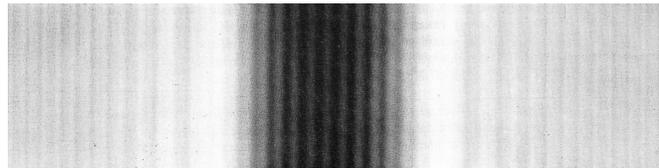


Abb.49: Helle und dunkle Beugungsstreifen

Bei Verwendung von weissem Licht entstehen farbige Streifen.

Ähnliche Erfahrungen hatte bereits F.M.GRIMALDI <sup>1)</sup> gemacht. Er wusste schon, daß das weiße Licht alle Spektralfarben enthält, und beobachtete, daß die durch enge Öffnungen hindurch fallenden parallelen Sonnenstrahlen keine scharfen Bilder dieser Öffnungen erzeugen. Vielmehr treten innerhalb der geometrischen Schatten um so deutlicher farbige Ränder auf, je kleiner die benutzten Öffnungen sind.

Diese Erscheinung bezeichnen wir als Lichtbeugung (Diffraktion) und erklären sie mit Hilfe des Wellenmodells für das Licht.

## 8.3 Interferenz am Doppelspalt

Zur näheren Untersuchung des Interferenzbildes wollen wir den **Doppelspaltversuch von YOUNG** <sup>2)</sup> nachvollziehen.

### Versuch:

#### Teil 1

Von einer Glühlampe ausgesendetes Licht (Abb.50) durchdringt zunächst einen schmalen Leuchtspalt. Dadurch wird ein sehr enges Lichtbündel ausgeblendet. Dieses Lichtbündel trifft auf den Doppelspalt. Das entstehende Interferenzbild wird auf dem Schirm beobachtet.

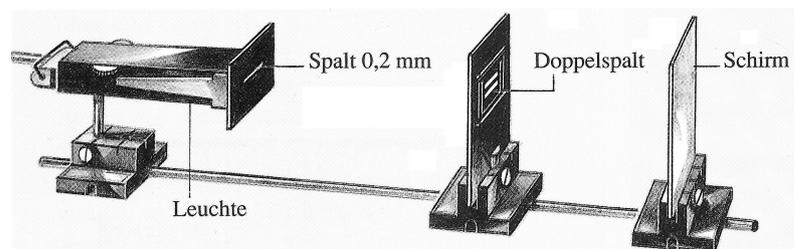


Abb.50: Versuchsaufbau Doppelspaltversuch von Young

<sup>1)</sup> Francesco Maria GRIMALDI (1618-1663): italienischer Mathematiker und Physiker



<sup>2)</sup> Thomas YOUNG (1773-1829): englischer Augenarzt



**Beobachtungen:**

Es entstehen helle und dunkle Interferenzstreifen (Abb.51). Der mittlere Streifen ist weiß, die übrigen sind mehrfarbig. Auf der Seite, die dem mittleren Streifen zugewandt ist, sind sie blau, auf der abgewendeten Seite rot.

Abb.51: Interferenzmuster beim Doppelspaltversuch

**Erklärung:**

Der Doppelspalt blendet aus dem ankommenden Licht zwei schmale, parallele Lichtbündel aus. Diese verlaufen sehr dicht nebeneinander. Infolge der **Beugung** gelangt das Licht auch an Stellen, die es bei streng geradliniger Ausbreitung nicht erreichen würde. Dadurch überlagern sich die Lichtbündel (ähnlich Wasserwellen), es entsteht ein Interferenzbild.

Die hellen Streifen sind die Stellen an denen Wellenberge bzw. Wellentäler zusammentreffen. Dort tritt Verstärkung auf. An den dazwischen liegenden Stellen liegt Auslöschung vor. Dort treffen Wellenberge mit Wellentälern zusammen.

**Teil 2**

Dann wird ein Blaufilter (Abb.52) in den Lichtweg gebracht, anschließend ein Rotfilter.

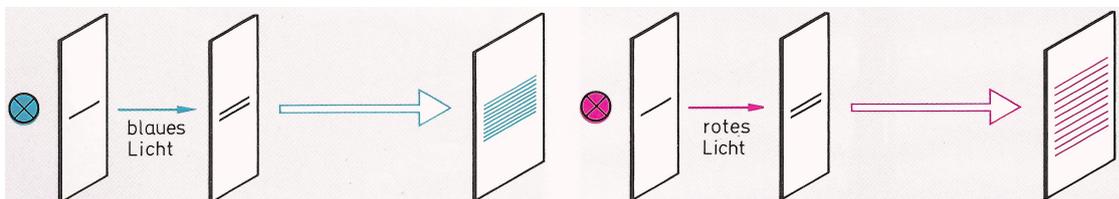


Abb.52: Interferenzmuster bei Lichtfiltern

**Beobachtungen:**

Alle Interferenzstreifen sind nun einfarbig. Bei blauem Licht ist der Abstand der Streifen kleiner als bei rotem Licht.

**Erklärung:**

Trifft das vom Leuchtpalt kommende blaue Licht senkrecht auf den Doppelspalt (Abb.53), so ist der Weg bis zum mittleren Interferenzstreifen auf dem Schirm für jeden Teil des Wellenzuges gleich lang (Abb.53 (a)). Dort tritt Verstärkung auf, da kein Gangunterschied zwischen den Wellenzügen vorliegt.

Für alle anderen unterscheiden sich die Wege der Wellenzüge. Dort wo der Gangunterschied genau eine halbe Wellenlänge beträgt, tritt Auslöschung auf (Abb.53 (b)). Bei einem Gangunterschied von einer Wellenlänge ist Verstärkung zu beobachten (Abb.53 (c)).

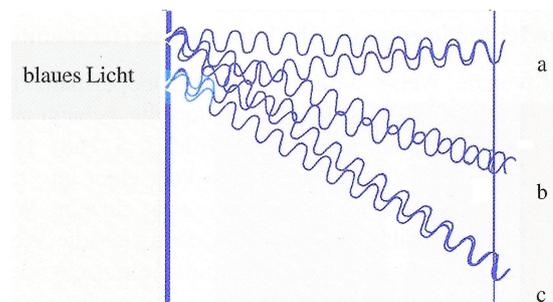


Abb.53: Wellenzüge bei blauem Licht

Beim rotem Licht liegen die Interferenzstreifen weiter auseinander (Abb.54). Der Gangunterschied von einer Wellenlänge entspricht einer größeren Entfernung. Das rote Licht besitzt eine größere Wellenlänge.

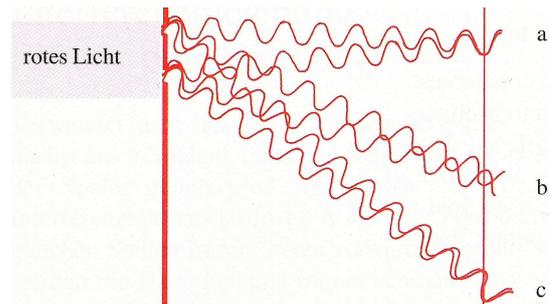


Abb.54: Wellenzüge bei rotem Licht

Die Bilder, die bei der Beugung und Interferenz am Doppelspalt auftreten, sind ein sicherer Beleg für die **Welleneigenschaften des Lichtes**.

## 8.4 Lichtgeschwindigkeit

Die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes ist interessant, da die Lichtgeschwindigkeit  $c$  (im Vakuum) als Naturkonstante eine universelle Bedeutung hat.

Die Lichtgeschwindigkeit im **Vakuum** ist von der **Frequenz unabhängig** und somit für alle elektromagnetischen Wellen (sichtbares Licht, Röntgenstrahlen, Radiowellen) gleich.

**Die Lichtgeschwindigkeit hat im Vakuum den grössten Wert und beträgt dort:**

$$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

In Materie ist die Lichtgeschwindigkeit jedoch geringer als im Vakuum. Das Verhältnis der Vakuumlichtgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit des Lichtes in einem Stoff ist durch die **Brechzahl  $n$**  des Stoffes gekennzeichnet.

Die Brechzahl ist von **Stoff** zu Stoff verschieden und ist außerdem von der **Frequenz abhängig**:

In **Gasen**, z.B. in Luft, ist die Geschwindigkeit des sichtbaren Lichtes nur wenig geringer (Abb.55) als im Vakuum. In **festen** und **flüssigen** Stoffen beträgt die Geschwindigkeit des sichtbaren Lichtes nur die Hälfte oder ein Drittel von der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Lichtgeschwindigkeit $c$ in m/s	Aggregatzustand:
Vakuum	$3,00 \cdot 10^8$
Luft	$3,00 \cdot 10^8$
Kohlenstoffdioxid	$2,66 \cdot 10^8$
Ethanol	$2,20 \cdot 10^8$
Wasser	$2,24 \cdot 10^8$
Diamant	$1,22 \cdot 10^8$
Glas	$(1,70-2,00) \cdot 10^8$
Kupfer(I)-oxid	$1,11 \cdot 10^8$
Steinsalz	$1,94 \cdot 10^8$

Abb.55: Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Stoffen

Da in Luft die Lichtgeschwindigkeit nur unbedeutend kleiner (etwa 0,03%) ist als im leeren Raum, werden wir in Zukunft für die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum und in Luft im allgemeinen den gerundeten Wert  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  (= 300 000 km/s) benutzen.

## 9 Laser

### 9.1 Funktionsweise

Laser ist die Abkürzung für „light amplification by stimulated emission of radiation“, d.h. Lichtverstärkung durch künstlich angeregte Aussendung von Strahlung.

Ein Laser besteht aus einer **Energiequelle** und einem **Resonator** (Abb.56).

Die Energiequelle hat die Aufgabe eine große Anzahl von Atomen des Lasermediums in **metastabile Anregungszustände** zu bringen. Dieser Vorgang wird als **Pumpen** bezeichnet.

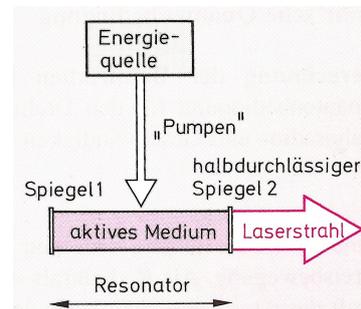


Abb.56: Aufbau eines Lasers

Am Beispiel eines **Rubin-Lasers** (Abb.57) soll der Vorgang etwas detaillierter erklärt werden:

Eine wendelförmige Gasentladungslampe umgibt einen zylinderförmigen Rubinkristall von Bleistiftstärke und 5 bis 10 cm Länge. Die Lampe sendet eine gelb-grüne Strahlung aus, die die Rubin-Ionen aus dem **Grundzustand** (Energieniveau  $W_1$ ) (Abb.58) auf angeregte Zustände mit einem Energieniveau  $W_3$  anhebt. Diesen Bereich bezeichnet man als **Energieband**, weil es sich um mehrere Energieniveaus handelt.

Nach kurzer Verweilzeit gehen die Elektronen aus dem Energieband unter geringer Energieabgabe (in Form von Wärme) spontan in den exakt definierten **metastabilen Energiezustand**  $W_2$  über.

Bei genügend starker Anregung (**Pumpen**) kann gleichzeitig ein großer Teil der Elektronen auf ein metastabiles Niveau angeregt und somit viel Energie gespeichert werden.

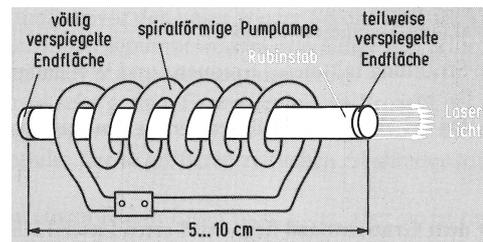


Abb.57: Aufbau Rubin-Laser

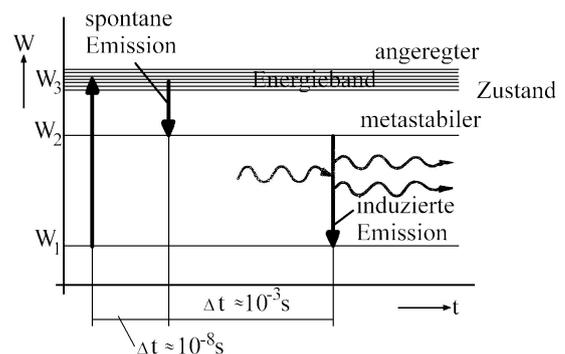


Abb.58: Energieniveaus beim Rubin-Laser

Ein **Lichtquant (Photon)**, das bei einer der seltenen spontanen Emissionen entsteht, löst eine Folge von **induzierten Emissionen** aus. Diese treffen auf weitere Elektronen im metastabilen Zustand, so daß die Zahl der induzierten Lichtquanten rasch ansteigt.

Ein **optischer Resonator** bewirkt, daß die Verstärkung des Lichtes nur in einer Richtung und nur für bestimmte Wellenlängen erfolgt. Der Resonator besteht im einfachsten Fall aus zwei parallelen Planspiegeln. Die Stirnflächen des Resonators müssen mit größter Präzision eben und parallel hergestellt werden, beim Rubin-Lasers beispielsweise durch Schleifen.

Zwischen den Stirnflächen befinden sich zahlreiche Atome im angeregten Zustand. Die Lichtwellen, die nicht achsparallel sind, gehen durch die seitliche Resonatorwand nach außen und sind für den Laser-Prozess bedeutungslos.

Die Lichtwellen, die senkrecht auf den Spiegel treffen, laufen im Medium mehrfach hin- und her, so daß sich **stehende Wellen** bilden. Diese besitzen genau die Energie, die Elektronen zu stimulierten Emissionen veranläßt. Durch diese werden die Wellen verstärkt.

Zwischen der Wellenlänge  $\lambda$  und dem Abstand  $l$  der Spiegel besteht die Beziehung  $l = k \cdot \lambda / 2$ , wobei  $k$  eine sehr große natürliche Zahl ist.

Damit die Laserstrahlung den Resonator verlassen kann, muß einer der Spiegel teildurchlässig sein.

Beim Rubin-Laser beträgt der Energieunterschied  $\Delta W (= W_2 - W_1)$   $\Delta W \approx 1,8 \text{ eV}$ .  
 Dies entspricht einer Frequenz  $f \approx 435 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  ( $= 435 \text{ THz}$ )  
 und einer Wellenlänge  $\lambda \approx 689 \cdot 10^{-9} \text{ m}$  ( $= 689 \text{ nm}$ ).



## 9.2 Laserarten

Man unterscheidet die Laser nach Art des aktiven Mediums, in dem die Energie gepumpt wird.

### Festkörperlaser

Neben dem Rubinlaser gibt es noch weitere Festkörperlaser (z.B. Neodym-Glaslaser oder Yttrium-Aluminium-Granat-Laser), bei denen jeweils Ionen in einem Kristallgitter angeregt werden.

Festkörperlaser werden beispielsweise zum Bohren sehr kleiner Löcher, Schneiden, Schmelzen und Verdampfen verwendet. Durch mehrfache Verstärkung können für den Bruchteil einer Sekunde ca. 1000 Millionen Kilowatt Leistung erzeugt werden.

### Gaslaser

Gaslaser enthalten ein Edelgas, Metalldämpfe oder ein anderes Gas, das durch eine elektrische Hochspannung zu Entladungen angeregt wird.

Sie werden beispielsweise für energieaufwendige Schneidaufgaben (Kohlenstoffdioxidlaser) verwendet. Leistungsschwächere Gaslaser werden zum berührungsfreien Messen (z.B. Dickenkontrolle von Blechen) eingesetzt.

### Halbleiterlaser

Die auch als **Dioden-Laser** bezeichneten Laser funktionieren mit einem Halbleiterkristall (z.B. Gallium-Arsenid). Diese lassen einen Stromfluß nur in einer Richtung zu. Halbleiterlaser können extrem klein (bis zur Größe eines Staubkorns) gebaut werden.

Die Hauptanwendung ist die Nachrichtenübertragung (Laserdioden zur Datenübermittlung in Lichtwellenleitern (Glasfasern)). Man findet sie zunehmend in elektronischem Zubehör (z.B. CD-Spieler).

## 9.3 Aus Wissenschaft und Technik

### 9.3.1 Laserdrucker

Die zu druckenden Daten (Zeichen und Grafiken) werden mit Hilfe eines Laserstrahls (Abb. 58) auf eine lichtempfindliche Schicht, die sich auf einer rotierenden Trommel befindet, projiziert (Fotoleiter- oder Bildtrommel).

An den vom Laser belichteten Stellen werden in der Entwicklerstation Tonerpartikel freigesetzt. Anschließend wird das Papier an der Fotoleitertrommel vorbeigeführt. Die Tonerpartikel auf der Fotoleitertrommel werden nun auf das Papier übertragen. Das Papier wird im Vorheizsattel auf mehrere 100 C erhitzt und läuft danach durch die Fixierwalzen, in denen der heiße Toner durch Druck in das Papier eingebrannt wird.

Die Fotoleitertrommel wird nun an der Entladestation entladen und an der Reinigungsstation gereinigt.

Nachdem die Fotoleitertrommel am Ladekorotron "vorbeigelaufen" ist, kann sie wieder neue Druckdaten aufnehmen.

Laserdrucker gehören zu den Seitendruckern, d.h. daß immer eine komplette Druckseite in den Druckerspeicher übertragen werden muß. Ein "Teilladen" einer Druckseite, wie z.B. bei Matrix- oder Tintendruckern, ist nicht möglich.

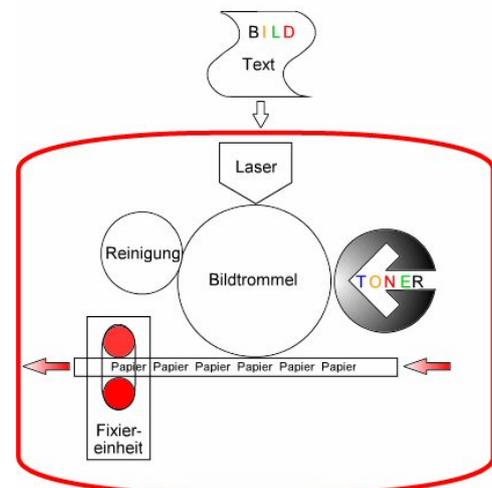


Abb.58: Funktionsschema Laserdrucker

### 9.3.2 CD-ROM-Laufwerk

Da die Daten auf einer CD („Compact Disc“) in digitaler Form (binär) gespeichert sind, besitzt eine CD eine viel bessere Abspielqualität als Datenträger, auf denen die Informationen analog gespeichert sind (z.B. Langspielplatte).

Die Toninformationen auf der CD sind unterhalb einer transparenten Schutzschicht, der mit einer reflektierenden Aluminiumschicht bedampften CD-Oberfläche, als digitale Signale in Form von einer dichten Folge mikroskopisch feiner **Pits** abgespeichert.

Als Pit bezeichnet man eine in diese CD eingebrannte Vertiefung mit einer Tiefe von 0,1 µm, einer Breite von 0,5 µm und einer Länge von 1 µm. Diese Pits werden entweder in die CD **gepreßt** (bei der Massenproduktion von CDs) oder sie werden von einem Laserstrahl **eingebrannt**, wie es bei CD-Brennern der Fall ist.

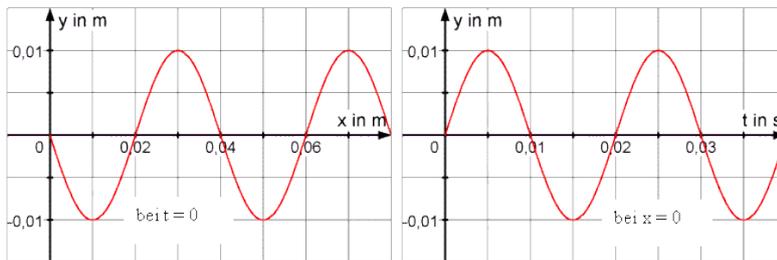
Die Pits sind wie auf einer Schallplatte spiralförmig angeordnet, laufen aber im Gegensatz zur LP von innen nach außen. Die Informationen, die auf eine CD gespeichert werden sollen, müssen vorher in eine 14- bis 16-stellige Binärkombination umgewandelt werden.

Beim Abspielen der CD werden die digitalen Informationen mit Hilfe eines **optoelektronischen Tonabnehmersystems** gelesen. Die Pits werden berührungslos mit einem fokussierten Lichtstrahl eines Halbleiterlasers abgetastet, so werden z.B. die gespeicherten Musikinformationen über einen Digital-Analog-Wandler (D/A-Wandler) in Stereosignale rückgewandelt.

## 10 Zusatzaufgaben

### Aufgabe 1

Gib die Wellengleichung für nachfolgend dargestellte Welle an.



### Aufgabe 2

Eine Transversalwelle hat die Amplitude 0,20 m und die Frequenz 175 Hz.

Das Teilchen im Koordinatenursprung hat zum Zeitpunkt  $t = 0$  s eine Auslenkung von 0 m. Zum Zeitpunkt  $t_1$  hat dieses Teilchen eine Auslenkung von 0,10 m.

Nach welcher Zeit hat das Teilchen wieder eine Auslenkung von 0,10 m?

### Aufgabe 3

In der Mittagspause findet an einem Ende einer 500 m langen Konstruktionshalle eine Explosion statt.

Einige Arbeiter dösen am anderen Hallenende, gegen die Wand gelehnt, ein Ohr an der Wand anliegend.

Andere Arbeiter rasten draußen, 500 m von der Explosion entfernt.

Die Explosion wird von den Arbeitern in der Halle 1,375 Sekunden früher gehört als draußen ( $c_{\text{Luft}} = 340$  m/s).

- Berechne die Schallgeschwindigkeit des Hallenwerkstoffes.
- Wie lange hätten die Arbeiter draußen gebraucht, um die Explosion zu sehen?
- Welche Wellenlänge hat ein Ton von 800 Hz in dem Hallenwerkstoff?

### Aufgabe 4

Eine Transversalwelle breitet sich in Richtung der positiven x-Achse mit der Geschwindigkeit  $c = 2,5$  m/s aus. Sie beginnt zur Zeit  $t = 0$  im Nullpunkt des Koordinatensystems. Die Frequenz beträgt  $f = 50$  Hz, die Amplitude 2 cm.

- Zeichne die Welle zu den Zeitpunkten  $t_1 = 0,050$  s und  $t_2 = 0,055$  s.
- Zeichne die Welle an der Stelle  $x = 3,75$  cm.
- Ein zweite Transversalwelle mit gleicher Wellenlänge, Frequenz und Amplitude läuft der ersten um den Gangunterschied  $\lambda/4$  voraus. Zeichne die zweite Welle an der Stelle  $x = 3,75$  cm.
- Konstruiere durch Addition die resultierende Welle.
- Stelle die Wellengleichungen dieser beiden Wellen auf.

**Aufgabe 5**

Ein mittig festgeklemmter Glasstab (Länge 30 cm) wird durch Reibung zu seiner Grundschiwingung erregt. Dabei versetzt er zunächst die Luft in einem Kundt-Rohr in Schwingungen. Ein zweiter Versuch wird mit Leuchtgas wiederholt.

Die Länge von 24 Knoten beträgt in Luft 49,0 cm, in Leuchtgas 74,8 cm.

Wie groß sind die Schallgeschwindigkeiten im Glas und im Leuchtgas? ( $c_{\text{Luft}} = 340 \text{ m/s}$ )

**Aufgabe 6**

Eine oben offene Orgelpfeife sendet den Kammerton „la“ (440 Hz) aus.

a) Wie groß ist die Luftsäule? (*Erg.: 0,386 m*)

b) Wie lang müssen Orgelpfeifen sein, damit sie das zwei Oktaven tiefer liegende „la“ (110 Hz) und die von der Netzwechselfrequenz bekannten Brummtöne (50 Hz und 100 Hz) aussenden? (*Erg.: 1,545 m; 3,4 m; 1,7 m*)

c) Welche Töne würden die vier Orgelpfeifen aussenden, wenn sie oben geschlossen wären? (*Erg.: 220 Hz, 55 Hz; 25 Hz; 50 Hz*)



## D Großtechnische Energiewandler

Die Primärenergieträger sind im Allgemeinen wenig geeignet, um beim Endverbraucher in Nutzenergie umgewandelt zu werden. Deshalb werden sie zunächst in Sekundärenergie umgewandelt, um die

Wandlungsfähigkeit,  
Transportfähigkeit und  
Speicherfähigkeit

der Energie im Vergleich zur Primärenergie zu verbessern.

Zwei dieser Kriterien werden in vorbildlichster Weise von der elektrischen Energie erfüllt. Daher steht sie weltweit in allen entwickelten Ländern großflächig zur Verfügung.

### 1 Bedeutung der elektrischen Energie

#### 1.1 Vorteile der elektrischen Energie

Stellen wir Vor- und Nachteile der elektrischen Energie gegenüber:

##### Vorteile

Die elektrische Energie

- lässt sich nahezu unbegrenzt mit besten Wirkungsgraden in andere Energieformen umwandeln.
- ist, beim Transport und bei der Umwandlung in Nutzenergie, sehr umweltfreundlich (es entstehen keine Schadstoffe; es ist keine Entsorgung von irgendwelchen Reststoffen erforderlich).
- lässt sich aus jeder Primärenergie erzeugen.
- ist masselos und nicht stoffgebunden.
- lässt sich rasch, zuverlässig, sauber und mit geringen Verlusten bis zum Endabnehmer verteilen.
- lässt sich sehr gut messen, steuern, regeln und elektronisch verarbeiten.
- ist in der modernen Informationsübertragung und in der Datenverarbeitung unersetzlich.

##### Nachteile

Die elektrische Energie

- lässt sich nicht unmittelbar in größeren Mengen speichern, d. h. sie muss in dem Moment erzeugt werden, in dem sie verbraucht wird.
- wird zum überwiegenden Teil in Wärmekraftprozessen erzeugt, deren Wirkungsgrade naturgesetzlich niedrig sind.
- ist für die energietechnische Übertragung leitungsgebunden.
- ist sowohl bei den Kraftwerken als auch den Leitungen außerordentlich kapitalintensiv.

Diese unverkennbaren Vorteile haben zu einem flächendeckenden Elektrizitätsversorgungssystem in ganz Europa und auch in anderen Ländern der Welt geführt. Die Industrie hat eine unglaubliche Vielfalt von elektrischen Geräten entwickelt, die dem Anwender alle möglichen Energiedienstleistungen zur Verfügung stellt.

Die elektrische Energie hat sich aus diesen Gründen sowohl für den Einzelnen als auch für die gesamte Wirtschaft zu einer Schlüsselenergie entwickelt, ohne die die modernen Industriestaaten nicht mehr überlebensfähig wären. Das zeigt sich immer dann, wenn die Stromversorgung - was sehr selten vorkommt - für eine gewisse Zeit ausfällt.

#### 1.2 Energiebedarf und Produktion

Wegen der großen Bedeutung der elektrischen Energie für die Volkswirtschaft wird etwa 1/3 der in Deutschland verbrauchten Primärenergieträger in elektrische Energie umgewandelt.

Die Nachfrage nach elektrischer Energie ist starken tages- und auch jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Abb.1 zeigt ein typisches Belastungsdiagramm für einen Winter- und für einen Sommertag.

Diese Schwankungen treten aufgrund der Verbrauchsgewohnheiten der Abnehmer der elektrischen Energie auf. Die typische Mittagsspitze kommt zustande, weil zu dieser Zeit in vielen Haushalten elektrisch gekocht wird. Das Nachttal rührt daher, weil nachts die meisten Industriebetriebe stillstehen und die Haushalte ruhen. Die Elektrizitätsversorgungsunternehmen müssen auf diese Nachfrageschwankungen unmittelbar reagieren, da sich elektrische Energie nicht speichern lässt. Zwar wird z. T. mit entsprechender Tarifgestaltung (billiger Nachttarif, teurer Tagtarif) versucht, die Unterschiede in der Stromnachfrage zu glätten, jedoch gelingt das nur begrenzt.

Technisch wird den Schwankungen Rechnung getragen, indem man Kraftwerke für unterschiedliche **Lastbereiche** einsetzt.

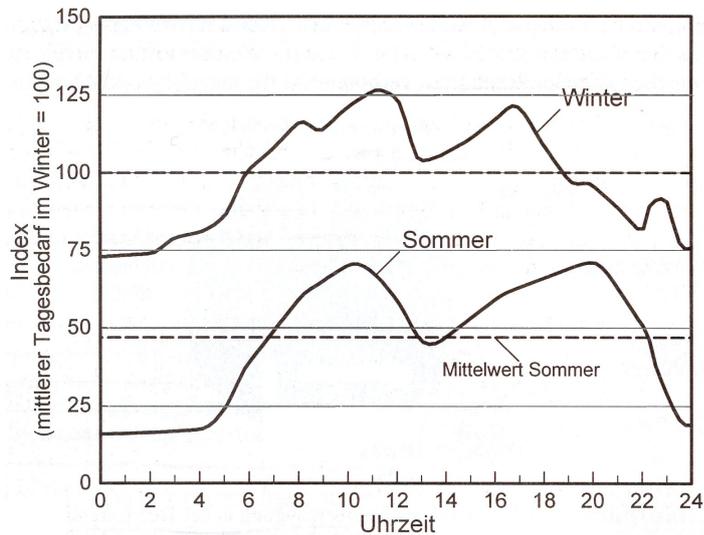


Abb.1: Elektrischer Energieverbrauch

### a) Grundlastbereich

Kraftwerke des Grundlastbereichs sind durchgehend im stationären Betrieb am Netz, da es technisch und/oder wirtschaftlich nicht sinnvoll ist, diese Kraftwerkstypen kurzfristig den Verbrauchsschwankungen anzupassen. **Flusskraftwerke, Kernkraftwerke** und Kohlekraftwerke, hier insbesondere **Braunkohlekraftwerke**, werden im Grundlastbereich betrieben. Das sind die Kraftwerke mit den preisgünstigsten Primärenergieträgern.

### b) Mittellastbereich

Der Teil der elektrischen Energie, der tagsüber zusätzlich benötigt wird, wird z. T. von Kraftwerken des Mittellastbereichs abgedeckt. In diesem Bereich kommen vor allem **Steinkohlekraftwerke** in Betracht, deren Leistungsabgabe gut steuerbar ist. Des Weiteren sind es **Erdgas-** und **Erdölkraftwerke**, die relativ schnell zu- und abgeschaltet werden können und deswegen den Mittellastbereich mit abdecken.

Die Baukosten dieser Kraftwerke sind niedriger, ihre Energiekosten sind jedoch gegenüber von den Kraftwerken des Grundlastbereiches höher.

### c) Spitzenlastbereich

In diesem Bereich benötigt man Kraftwerke, mit denen man sehr schnell, d.h. innerhalb von Minuten, auf kurzfristige Lastschwankungen reagieren kann. Diese Kraftwerkstypen müssen in kurzer Zeit auf volle Leistung hochgefahren und ebenso wieder heruntergefahren werden können. **Speicher** und **Pumpspeicherkraftwerke** werden in diesem Bereich ebenso eingesetzt wie **Gasturbinenkraftwerke**.

Da diese Kraftwerke nur in kurzen Zeiten des Spitzenbedarfs arbeiten, spielen die Betriebskosten eine untergeordnete Rolle.

Bei den Pumpspeicherkraftwerken wird in der nachfragearmen Nachtzeit Wasser in das Hochbecken gepumpt. Bei Spitzenbelastung läßt man es ins Talbecken strömen und treibt damit Turbinen an, um die Lastspitze abzudecken.

## 1.3 Herkunft der elektrischen Energie

Weltweit wurden im Jahr 2016 90 EJ elektrische Energie erzeugt.

Aus Abb.2 geht hervor, dass ca. 65% des Stroms aus fossilen Energien gewonnen wurden. Kohle ist weltweit die wichtigste Primärenergie bei der Stromproduktion, gefolgt von Gas und den erneuerbaren Energien, davon insbesondere Wasser.

Der Gesamtanteil der erneuerbaren Energien liegt bei ca. 25%

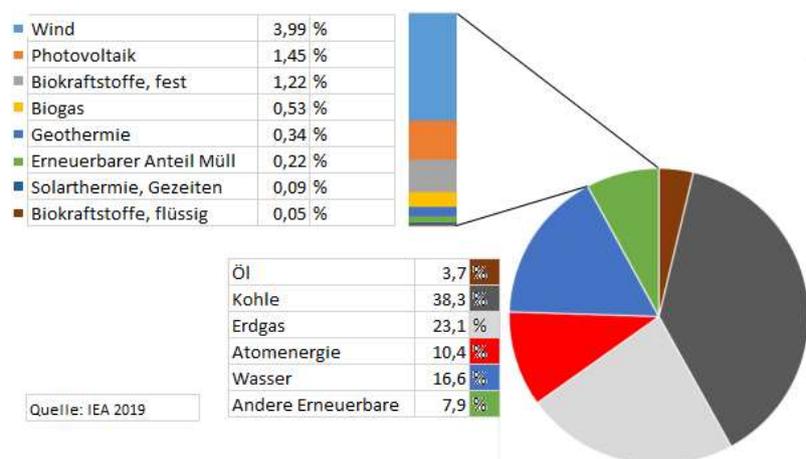


Abb.2: Weltweite Stromerzeugung

## 2 Kohlekraftwerke

### 2.1 Einleitung

Kohlekraftwerke (KKW) sind **Wärme**kraftwerke. Die dort produzierte elektrische Energie wird durch Umwandlung von der in der Kohle gebundenen **chemischen Energie** erzeugt, wobei zunächst durch Verbrennung **Wärmeenergie** erzeugt wird.

Aus thermodynamischen <sup>1)</sup> Gründen kann nur ein Teil der Wärmeenergie in **Arbeit** bzw. **elektrische Energie** umgewandelt werden. Ein großer Teil muss abgeführt werden. Er wird über **Kühltürme** (Abb.1) an die Umgebung abgegeben.



Abb.1: Kohlekraftwerk

In Deutschland wird zurzeit die meiste elektrische Energie in Kohlekraftwerken produziert. Man unterscheidet zwischen **Braunkohle** und **Steinkohle**, von denen es jeweils noch verschiedenen Sorten (Weichbraunkohle, Glanzbraunkohle u.a. oder Fettkohle, Anthrazit u.a.) gibt.

Braunkohle ist die geologisch gesehen die jüngere der beiden Kohlearten. Ihr Wassergehalt ist höher und ihr Heizwert ist dreimal geringer als der von Steinkohle. Braunkohle kann in Tagebau gefördert werden, im Gegensatz zur Steinkohle die in tieferen Erdschichten liegt und daher unter Tage gefördert werden muss.

Wegen des geringeren Heizwertes lohnt der Transport von Braunkohle nicht. Braunkohlekraftwerke befinden sich daher nahe der Kohleabbaustätte, wogegen Steinkohlekraftwerke ihren Brennstoff teilweise von sehr weitem angeliefert bekommen.

Die betriebenen Kohlekraftwerke haben eine Leistung von etwa 200 MW bis 1000 MW. Diese Angaben beziehen sich auf die abgegebene elektrische Leistung.

### 2.2 Funktionsweise

Die Kohle ist im Anlieferungszustand ein Feststoff, der sich hauptsächlich aus Kohlenstoff mit einer gewissen Feuchtigkeit zusammensetzt. Zusätzlich besteht Kohle aus Wasserstoff, Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff und mineralischen Stoffen.

In Abb.5 ist ein Kraftwerk schematisch dargestellt.

Die angelieferte Kohle wird zunächst gemahlen und getrocknet. Dann wird sie mit vorgewärmter Luft in der **Brennkammer (Kessel)** bei ca. 1200°C verfeuert. Häufig wird dazu ein Wirbelschichtverfahren (schwebend Verbrennung) verwendet.

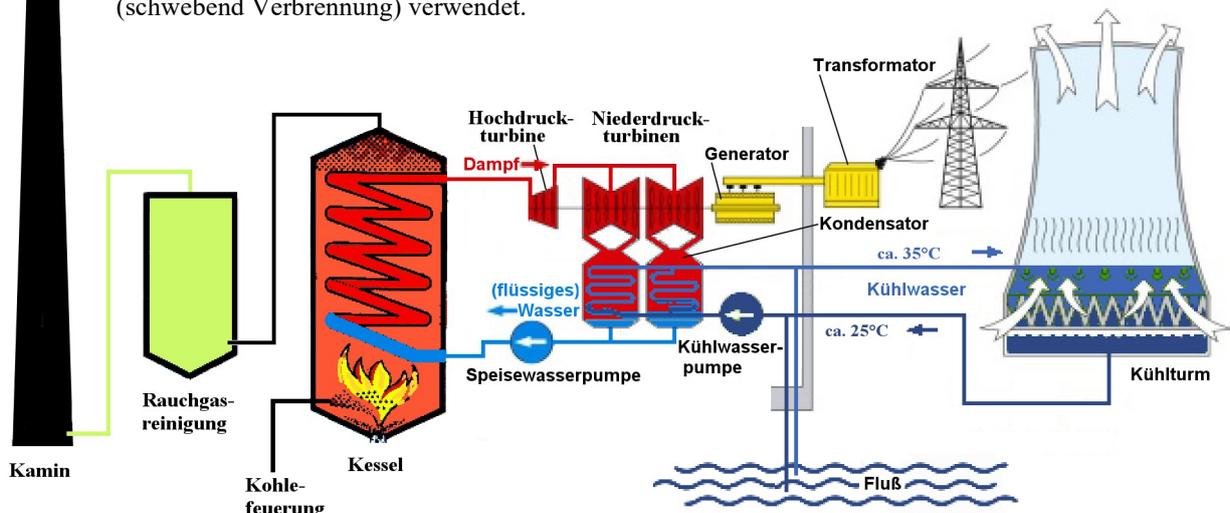


Abb.5: Schematische Darstellung eines Kohlekraftwerkes

<sup>1)</sup> Thermodynamik = Wärmelehre

Der Kohlenstoffanteil oxidiert dabei zu Kohlenstoff. Der Schwefel oxidiert ebenfalls, die mineralischen Einschlüsse verbrennen zu Asche. Bei den hohen Verbrennungstemperaturen reagiert der Stickstoff aus der Kohle ebenso wie ein Teil des Luftstickstoffes mit dem Sauerstoff.

Der Kessel dient als **Dampferzeuger**. Die **Wärme** der heißen Verbrennungsgase geht auf das Wasser des Dampfkreislaufes über. Hierzu verlaufen im Kessel viele Kilometer Rohrleitungen, damit das durch die Speisewasserpumpe geförderte Wasser im Kessel verdampfen kann.

Der Dampf, der den Kessel verlässt, strömt durch einen Zwischenüberhitzer und einen **Dampftrockner**. Er erreicht die Dampfturbine mit einer Temperatur von mehr als 500°C und steht unter ca. 250 bar Druck.

In der Dampfturbine werden die im Dampf enthaltene Wärme- und Druckenergie in Bewegungsenergie des **Läufers** umgewandelt ist.

Die Dampfturbine (Abb. 6 und 7) besteht aus mehreren **Leiträdern** und **Laufträgern**, die abwechselnd angeordnet sind. Die **Leitschaufeln** der Leiträder sind am Gehäuse fixiert und leiten den Dampf auf die **Laufschaufeln**.

Diese sind an der rotierbaren Welle, dem Läufer (Abb.8), fixiert. Ein Teil der im Dampf enthaltenen Energie wird am Lauftrieb in **mechanische Energie** umgewandelt, der Läufer dreht.

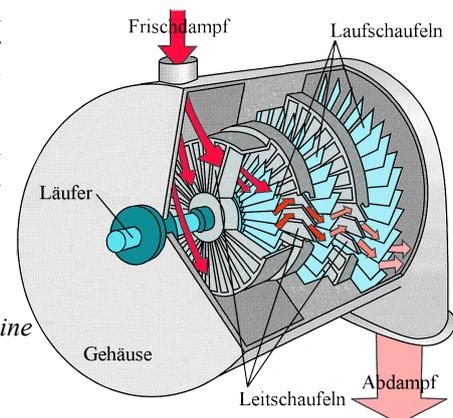


Abb.6: Aufbau einer Dampfturbine

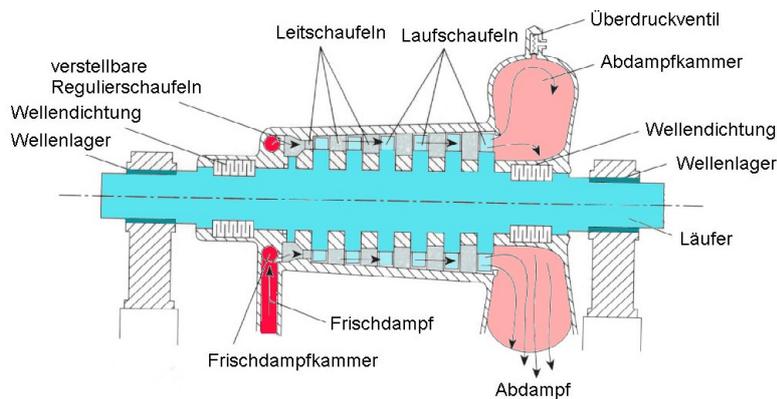


Abb.7: Schnittdarstellung einer Dampfturbine



Abb.8: Arbeiten am Läufer

Der energieärmere Dampf strömt zum nächsten Leitrad und wird dort wiederum auf das nächste Lauftrieb gelenkt. Dieser Vorgang wiederholt sich fortwährend.

Der Dampf entspannt sich auf dem Weg durch die Turbine immer mehr, sein Druck und seine Temperatur fallen. Der Durchmesser der Räder vergrößert sich daher kontinuierlich, damit bei geringerem Druck die größeren Schaufeln ein entsprechendes Drehmoment liefern können. Man unterscheidet dabei zwischen dem **Hochdruckteil**, dem **Mitteldruck-** und dem **Niederdruckteil** der Turbine. Je nach Größe des Kraftwerkes handelt es sich hierbei um separate Turbinen.

Der Läufer ist mit dem **Generator** verbunden, der die mechanische Energie des Läufers in **elektrische Energie** umwandelt.

Die elektrische Energie wird im **Transformator** auf eine hohe Spannung umgewandelt und dann über Hochspannungsleitungen landesweit oder grenzüberschreitend verteilt.

Der Wasserdampf steht beim Austritt aus der Niederdruckturbine unter einem Druck von 0,04 bar und hat eine Temperatur von 35°C. Er hat noch immer den gasförmigen Aggregatzustand.

Im nachfolgenden **Kondensator** wird er soweit abgekühlt, dass er verflüssigt. Mit der weiter vorne erwähnten **Speisewasserpumpe** wird er wieder in den Kessel gepumpt. Der **Dampf-Kreislauf** beginnt somit erneut.

Zur Wärmeabgabe des Dampfes im Kondensator gibt es einen **Kühlwasser-Kreislauf**. Das Kühlwasser nimmt im Kondensator die Wärme auf und gibt sie anschließend an die Umgebung ab.

Die abzuführende Wärmeenergie ist sehr groß. Thermodynamisch bedingt ist sie größer als die vom Kraftwerk produzierte elektrische Energie.

Deswegen werden meistens riesige Kühltürme verwendet, in denen das erwärmte Kühlwasser versprüht und durch entgegen strömende Luft gekühlt wird. Dabei verdunstet ein Teil des Wassers. Die dem Wasser entzogene **Verdunstungswärme** trägt zur Abkühlung des Wassers bei.

Die Verluste an Kühlwasser müssen durch frisches Wasser ersetzt werden. Daher sind Kohlekraftwerke immer in der Nähe eines Flusses errichtet. Ein Teil des erwärmten Kühlwassers kann auch direkt in den Fluss fließen. Allerdings darf aus ökologischen Gründen die Flusstemperatur nicht zu hoch werden.

## 2.3 Wirkungsgrad und Energieverluste

Die **Thermodynamik** lehrt uns, dass der größtmögliche Wirkungsgrad eines rechtsgängigen **Kreisprozesses**<sup>1)</sup> der **Carnot**<sup>2)</sup>-Wirkungsgrad ist.

Er berechnet sich wie folgt:

Carnot-  
Wirkungsgrad

$$\eta = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

$\eta$ : Wirkungsgrad des Carnot-Kreisprozesses<sup>3)</sup>

$T_{\min}$ : niedrigste Temperatur im Kreisprozess in K

$T_{\max}$ : höchste Temperatur im Kreisprozess in K

Berechnung des Carnot-Wirkungsgrades mit den Temperaturen eines realen Kohlekraftwerkes:

Als niedrigste Temperatur im Kreisprozess kann die Umgebungstemperatur (beispielsweise 20°C oder 30°C) angenommen werden.

Aufgrund der Wärmefestigkeit der Stähle ist die höchste Temperatur auf Werte zwischen 500°C und 600°C begrenzt.

Daraus ergibt sich ein größtmöglicher Wirkungsgrad von 67%.

Der Carnot-Kreisprozess ist ein theoretischer Kreisprozess. **Reale Kreisprozesse** haben aufgrund von irreversiblen Vorgängen geringere Wirkungsgrade.

Ein Kohlekraftwerk arbeitet nicht nach dem Carnot-Prozeß, sein Wirkungsgrad ist somit noch geringer.

Die realen Wirkungsgrade von Kohlekraftwerken liegen weltweit durchschnittlich bei ca. 20%. Die deutschen Kraftwerke liegen bei ca. 38%.

Im Kohlekraftwerk finden mehrere Energiewandlungen statt, die jeweils mit Verlusten behaftet sind. Zudem geht Energie durch Reibung und Wärmeverluste verloren.

<sup>1)</sup> Kreisprozesse sind Vorgänge, bei denen kontinuierlich Wärme in Arbeit (z.B. Verbrennungsmotor) bzw. Arbeit in Wärme (z.B. Kühlschrank) umgewandelt wird.

<sup>2)</sup> CARNOT, Nicolas Léonard Sadi (1796 – 1832), französischer Physiker und Militäringenieur, berechnete Wärmemaschinen, legte Grundlagen zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik, „Vater der Thermodynamik“

<sup>3)</sup> Der Carnot-Kreisprozeß ist der Kreisprozeß mit dem größtmöglichen Wirkungsgrad.



Im **Energiefluss (Sankey-) diagramm** (Abb.9) sind verschiedene Verluste dargestellt.

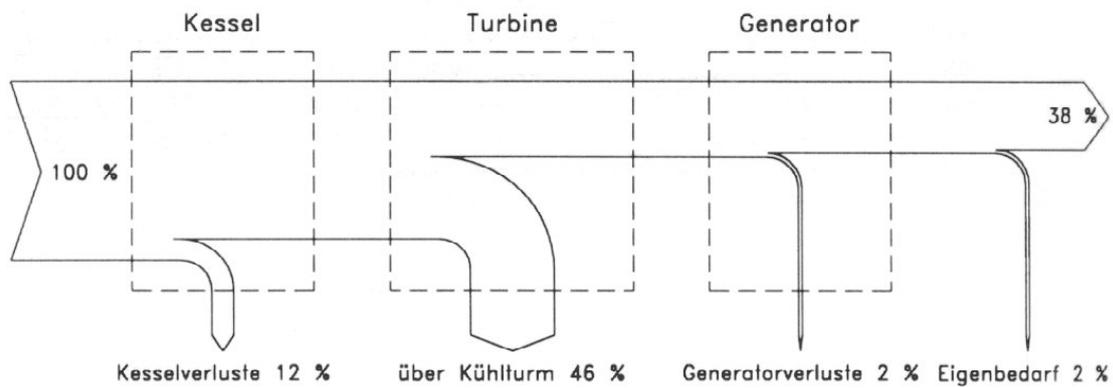


Abb.9: Energieflussdiagramm (Quelle: Schubert: Energie/ H+T)

Die Kesselverluste ergeben sich teilweise durch die hohen Temperaturen bei der Feuerung (Wärmeleitung und Strahlungswärme des Kessels), hauptsächlich jedoch durch die Wärmeenergie der heißen Abgase.

Die Verluste am Kühlturm entsprechen der **Kondensationswärme** des Speisewassers.

Darüber hinaus wird bereits beim Transport der Kohle zum Kraftwerk Energie verwendet.

Zusätzlich ist der Transport der elektrischen Energie bis zum Endverbraucher mit Verlusten von 8% bis 10% behaftet.

Entsprechend kommt letztendlich nur ein kleiner Teil der Energie, die in dem fossilen Brennstoff Kohle chemisch gebunden war, als elektrische Energie beim Verbraucher an.

## 3 Kernkraftwerke

### 3.1 Kernbrennstoffe

In Analogie zu der herkömmlichen Verbrennung, beispielsweise der von Kohle, bezeichnet man auch das im Kernreaktor eingesetzte Spaltmaterial als **Kernbrennstoff**, obwohl keine Verbrennung, sondern eine **Kernspaltung** stattfindet. Als Kernbrennstoff eignen sich nur schwere Kerne ( $A > 200$ ) mit ungerader Massenzahl. Zudem dürfen keine Begleitstoffe enthalten sein, die Neutronen einfangen.

Von den in der Natur vorkommenden Kernbrennstoffen hat bislang nur das Uranisotop  $^{235}\text{U}$  (Abb.9) größere praktische Bedeutung bei der Energiegewinnung durch Kernspaltung erlangt. Natürlich vorkommendes Uran besteht aber nur zu etwa 0,7% aus dem mit **thermischen Neutronen spaltbaren U 235** und zu 99,3 % aus dem praktisch nicht spaltbaren U 238.



Abb.9: Uran

Das Schwermetall Uran ist ziemlich gleichmäßig über die Kontinente verteilt und es ist keineswegs ein seltenes Metall; es kommt allerdings meist nur in sehr geringen Konzentrationen vor, so daß sich oft die Frage nach einer wirtschaftlichen Gewinnung des Urans stellt. Die untere Grenze des noch wirtschaftlichen Abbaus liegt bei ca. 0,1 % Urangehalt im Erz. Einen Eindruck

von dem erforderlichen Aufwand kann man dadurch bekommen, wenn man sich überlegt, dass man bei obigem Grenzwert 1 t Erz fördern muss, um 1 kg Natururan zu erhalten. Darin ist aber nur zu 0,7 % das spaltbare Isotop U 235 enthalten, d h. aus **1 t Ausgangsmaterial** erhält man ganze **7 g Spaltstoff**. Das relativiert natürlich auch die Aussage über die theoretisch hohe Energiedichte der Kernenergie.

Grundsätzlich handelt es sich auch beim Uran um einen erschöpflichen Rohstoff. Aussagen über die Reichweite sind kaum möglich, da sie in starkem Maße vom Ausbaugrad der Kernenergie, von den Gewinnungskosten und von der Nutzung der Brütertechnologie abhängt. Legt man die derzeitigen sicheren Vorräte mit einem Urangehalt von mindestens 0,3 % und einen gleich bleibenden Verbrauch zugrunde, so erhält man eine Reichweite von ca. 50 Jahren. Da der Ausbau der Kernkraft stagniert, ist mit einer Verknappung des Urans derzeit nicht zu rechnen.

Zwar wäre es grundsätzlich möglich, Kernreaktoren mit Natururan (99,3 % U 238 und 0,7 % U 235) zu betreiben, jedoch müssten dazu aufwendige Reaktoren eingesetzt werden, die große Mengen von Uran enthalten. Zudem müßte die Moderation mit schwerem Wasser oder Grafit erfolgen, da diese Stoffe eine wesentlich geringere Neigung zum Neutroneneinfang haben als normales Wasser. Nur mit diesem erhöhten Aufwand ließe sich eine Kettenreaktion im Natururan aufrechterhalten.



Bei der Energiegewinnung durch Kernspaltung ist es deshalb üblich, das gewonnene Natururan **anzureichern**. Darunter versteht man, dass die Konzentration des U 235 im Kernbrennstoff auf 2,5 bis 4 % erhöht wird. In einer ersten Anreicherungsstufe am Erzlagerort entsteht pulverförmiges „Yellowcake“ (Abb.10), ein Gemisch von Uranverbindungen. Aus zwei Tonnen Erz enthält man einen Kilogramm Yellowcake.

Es gibt verschiedene Anreicherungstechniken, die letztlich alle darauf beruhen, daß das U 235-Isotop ca. 1 % leichter ist als das U 238-Isotop. Der zur Anreicherung erforderliche Aufwand ist aufgrund des geringen Massenunterschieds der beiden Isotope technisch anspruchsvoll und energetisch hoch.

Abb.10: Yellowcake

Das angereicherte Uran wird in pulverförmiges **Urandioxid** umgewandelt. Daraus werden **Brennstofftabletten** (Pellets) (Abb.11) gepresst.



Abb.11: Brennstofftablette

Die Brennstofftabletten (Pellets) werden in ein Hüllrohr aus einer Speziallegierung gegeben, das gasdicht verschlossen ist. Man spricht von einem **Brennstab** (Abb.12).

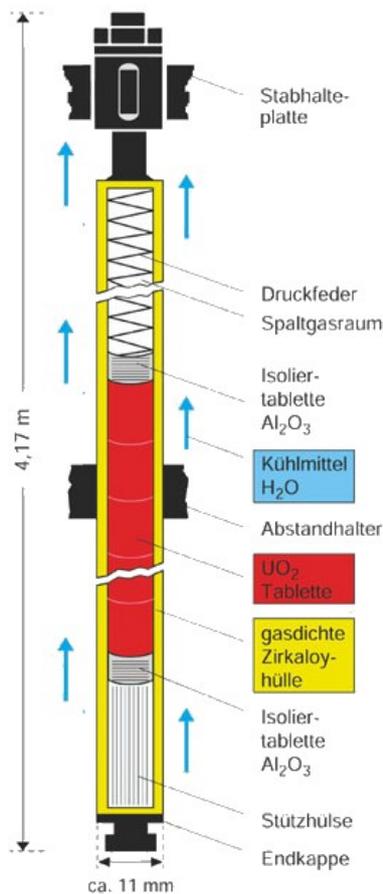


Abb.12: Brennstab

In den Brennstäben läuft die kontrollierte Kettenreaktion ab, sie enthalten also zunächst das angereicherte Uran und später die stark radioaktiven Spaltprodukte. Zudem muß von der Oberfläche der Brennstäbe die erzeugte Wärmeenergie an das Kühlmittel abgeführt werden.

Kühlmittel und Brennstäbe dürfen nicht in unmittelbaren Kontakt kommen, um die Kontamination des Kühlmittels so gering wie möglich zu halten.

Im Brennstab sind leere Räume enthalten, welche die bei der Spaltung entstehenden radioaktiven Spaltgase aufnehmen können.

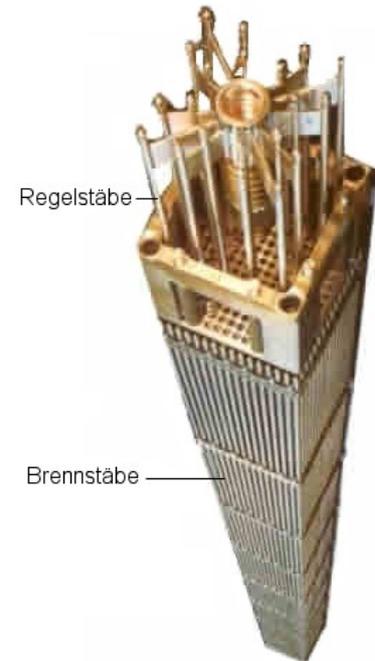


Abb.13: Brennelement

Eine Vielzahl solcher Brennstäbe wird mittels Abstandhalter zu einem Bündel, das man **Brennelement** (Abb.13) nennt, zusammengefaßt.

### 3.2 Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren

Die Stromerzeugung durch Kernenergie erfolgt weltweit hauptsächlich in sogenannten Leichtwasserreaktoren (LWR)(Abb.14).

Diese Bezeichnung rührt daher, daß als **Moderator leichtes Wasser** verwendet wird.



Abb.14: Kernkraftwerk „Three Mile Island“ (800 MW) bei Harrisburg/USA

Der Kernreaktor besteht aus dem **Reaktordruckbehälter** (Abb.15 und 17), der die Einbauten des **Reaktorkerns** (uranhaltige **Brennelemente und Regelstäbe**) (Abb.16) enthält.

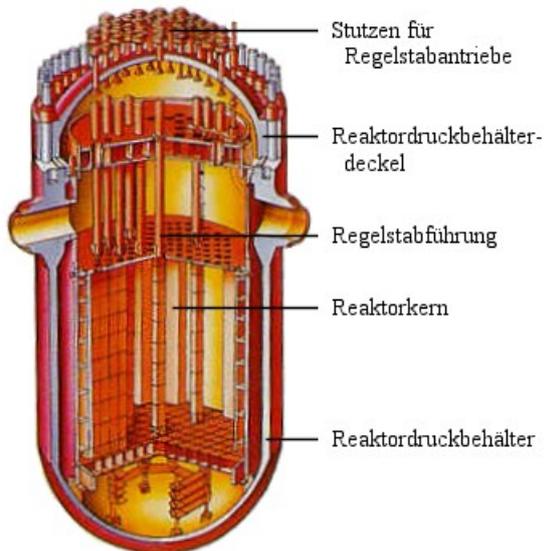


Abb.15: Reaktordruckbehälter (eines Druckwasserreaktors) mit Reaktorkern

Die Einbauten des Reaktorkerns bestehen aus den bereits beschriebenen Brennelementen und den Regelstäben

Je weiter die Regelstäbe in den Kern hineingeschoben werden, umso mehr Neutronen fangen sie ein.

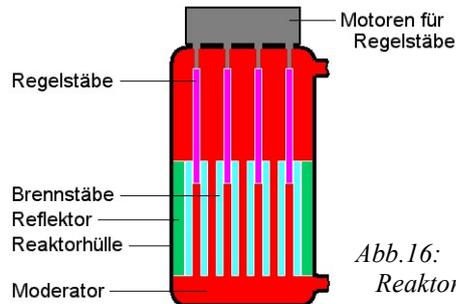
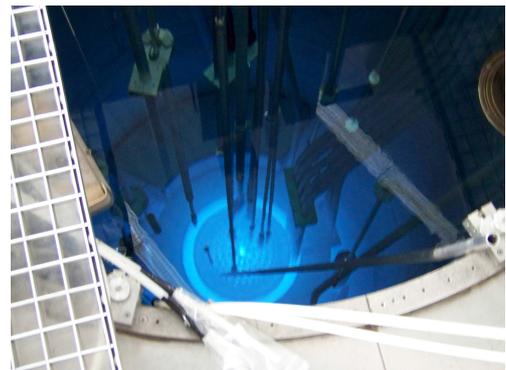


Abb.16: Einbauten im Reaktorkern

Bei den Leichtwasserreaktoren hat das **Wasser** eine **Doppelfunktion**:

- Zum einen dient es als **Kühlmittel**, das die bei der Spaltung freigesetzte Wärme aus dem Reaktorkern heraustransportiert.
- Zum anderen ist das Wasser der **Moderator**, der die schnellen Spaltneutronen durch ca. 20 Stöße zu thermischen Neutronen abbremst, so daß sie anschließend einen U-235-Kern spalten können. Diese Doppelfunktion ist ein wesentlicher Vorteil der Leichtwasserreaktoren, sie führt zu besonders einfach aufgebauten Reaktoren.

Abb.17: Blick in den Reaktordruckbehälter



**Leichtwasserreaktoren sind zudem selbststabilisierend**: Eine erhöhte Spaltaktivität bewirkt eine höhere Wärmeproduktion, wodurch die Temperatur des Wassers steigt. Dadurch nimmt seine Dichte ab, es sind weniger Moderatorkerne pro Volumeneinheit vorhanden, so daß die Moderatorwirkung abnimmt. Weniger thermische Neutronen bedeuten aber weniger Spaltungen, wodurch die Energiefreisetzung reduziert wird.

Wenn durch ein Leck im Kühlsystem das Kühlwasser ausdampfen sollte, reißt die Kettenreaktion sofort ab, weil kein Moderator mehr vorhanden ist. Ein Durchgehen eines Leichtwasserreaktors im Sinne einer unkontrollierten Kettenreaktion (wie bei einer Atombombe) ist physikalisch nicht möglich.

Allerdings besteht hier die Gefahr eines GAU's, siehe hierzu den Abschnitt „3.4.2 Beherrschung von Störfällen“.

Bei den Leichtwasserreaktoren sind **zwei unterschiedliche Reaktorlinien** in Betrieb, und zwar **Siedewasserreaktoren und Druckwasserreaktoren**.

### 3.2.1 Siedewasserreaktoren

Kernkraftwerke mit Siedewasserreaktoren (SWR) sind ähnlich aufgebaut (Abb.18) wie konventionelle Dampfkraftwerke, beispielsweise wie Kohlekraftwerke. Die Dampferzeugung erfolgt allerdings hier im Kernreaktor selbst, der zu etwa 2/3 mit Wasser gefüllt ist.

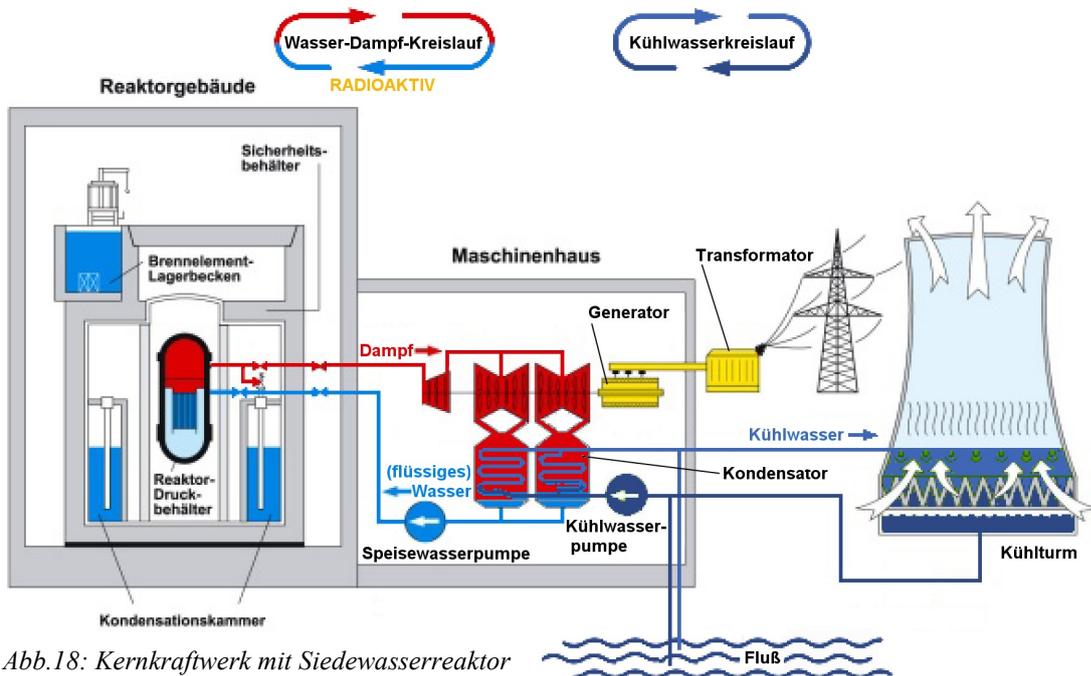


Abb.18: Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor

Die in den Brennelementen erzeugte Wärme bringt das Wasser im Reaktor zum Sieden. Der dadurch entstehende Wasserdampf wird nach Trocknung direkt zur Turbine geführt. Das nach der Turbine kondensierte Wasser wird mit Hilfe von Pumpen in das Reaktor Druckgefäß zurückgepumpt.

Beim Siedewasserreaktor ist im Unterschied zum Druckwasserreaktor **nur ein Wasser /Dampfkreis** vorhanden. Da im Reaktorkern eine radioaktive Kontamination des Wassers bzw. des Dampfes entsteht, müssen alle Komponenten des Dampfkreislaufes einschließlich der Turbinen in die Strahlenschutzmaßnahmen einbezogen werden. Aus diesem Grunde benötigt beim Siedewasserreaktor auch das Maschinenhaus eine sichere Abschirmung.

### 3.2.2 Druckwasserreaktoren

Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor (Abb.19 und 26) (DWR) besitzen **zwei Kreisläufe**. Der erste Kreislauf, der Primärkreislauf, transportiert die Wärme aus dem Reaktor, ohne daß das Wasser in diesem Kreislauf siedet. Das ist möglich, weil das Wasser unter entsprechend hohem Druck steht.

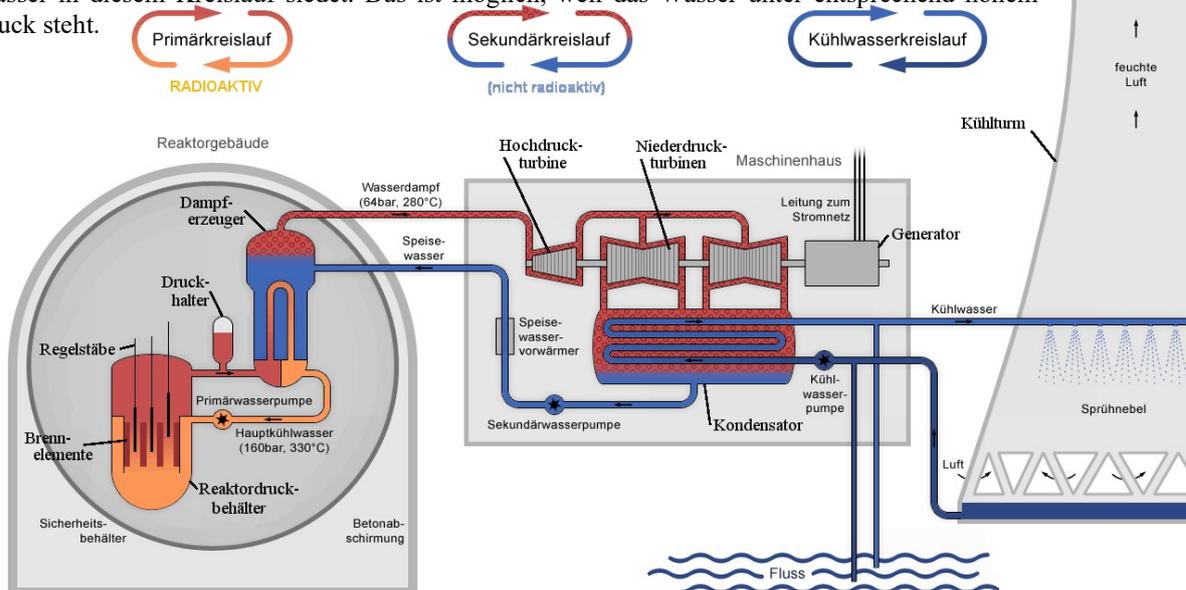


Abb.19: Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor

Die Wärme wird über einen Wärmetauscher an einen Sekundärkreis mit Dampferzeuger abgegeben. Dieser Sekundärkreis schließlich enthält die Turbine. Das hat den Vorteil, daß durch die zwei getrennten Kreisläufe der Sekundärkreislauf keine radioaktiven Verunreinigungen enthält, weshalb auch keine Abschirmungen zum Strahlenschutz im Sekundärkreislauf erforderlich sind. Freilich ist ein höherer Aufwand für die zwei Kreisläufe nötig, zudem ist dadurch der Wirkungsgrad etwas geringer.

### 3.3 Kernkraftwerke mit Brüter

Kernkraftwerke mit Brütertechnologie sind Kernkraftwerke, die mehr spaltbares Material erzeugen als sie verbrauchen. Hierbei führt die Absorption von schnellen Neutronen an U 238-Kernen zur Bildung von spaltbaren Plutonium-Kernen Pu 239. Wegen der schnellen Neutronen und dem Erzeugen von neuen Stoffen spricht man von „schnellen Brüttern“.

Diese Absorptionen finden auch ab und zu in Leichtwasserreaktoren statt. Die erbrüteten Plutonium-Kerne werden dann in der Folge gespalten oder verbleiben im Brennstab.

Kernkraftwerke, die ausschließlich mit Brüttern arbeiten, sind technologisch und sicherheitstechnisch aufwendig, da die frei werdenden Neutronen nicht moderiert werden dürfen. An Stelle von Wasser als Kühlmittel wird flüssiges Natrium verwendet.

Des Weiteren ist das erbrütete Plutonium ein sehr gefährlicher Stoff. Es ist giftig und das Einatmen von nur sehr geringen Mengen erhöht das Risiko für Lungenkrebs deutlich. Außerdem ist es waffenfähig, seine kritische Masse zur Herstellung einer Atombombe ist dabei kleiner als die von Uran U 235.



Abb.20: Aufruf zur Demonstration

Aus diesen Gründen hat sich in Deutschland die Bevölkerung sehr stark gegen den Bau eines Brütters gewehrt (Abb.20). Das bereits fertig gestellte Kernkraftwerk in Kalkar wurde letztendlich nie in Betrieb genommen und dient heute als Hotel-/Tagungszentrum und Freizeitpark (Abb.21).



Abb.21: Freizeitpark Kalkar

### 3.4 Sicherheit von Kernkraftwerken

Kernkraftwerke enthalten nach einiger Betriebszeit im Reaktorkern eine erhebliche Menge verschiedener radioaktiver Spaltprodukte und giftiger Schwermetalle. Welche Katastrophe entsteht, wenn große Mengen dieses Materials in die Umwelt gelangen, hat das Reaktorunglück von Tschernobyl (Abb.22) gezeigt. Selbst in Deutschland, über 1000 km Luftlinie entfernt, waren die Auswirkungen noch messbar und sorgten für erhebliche Verunsicherung in der Bevölkerung. Wesentlich gravierendere Folgen hatte das Unglück für die Bevölkerung in der Nähe des Kraftwerks und erst recht für das Kraftwerkspersonal.

Es wurden über 100 000 Personen evakuiert. Erhöhte Krebsraten und Missbildungen bei Neugeborenen sind die Folge. Selbst auf spätere Generationen wird sich diese Katastrophe durch genetische Veränderungen noch auswirken. Umsiedlungen der Anwohner in andere Gegenden mussten im großen Stile durchgeführt werden. Eine 30-km-Sperrzone ist errichtet worden. Freigesetzt wurden die typischen radioaktiven Spaltprodukte, die sich während des Betriebs eines Kernreaktors ansammeln, wie die Isotope Jod,

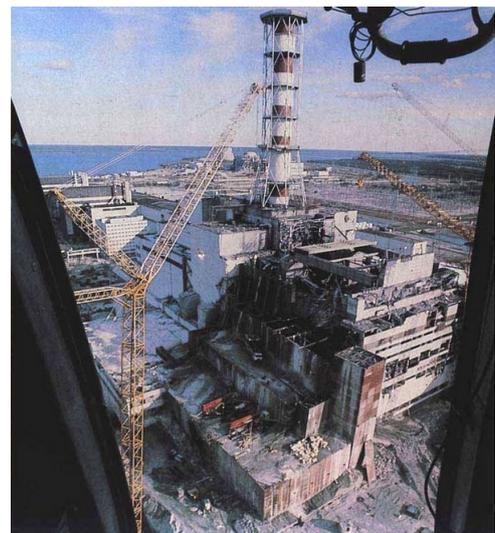


Abb.22: Unfall in Tschernobyl 1986

Cäsium, Barium, Strontium, Plutonium usw. Da manche der freigesetzten, radioaktiven Spaltstoffe lange Halbwertszeiten haben, wird dieses Gebiet für viele Generationen radioaktiv verseucht bleiben.

Es muss angemerkt werden, daß es sich beim Unglücksreaktor um einen anderen Reaktortyp handelt als die in Deutschland ausschließlich betriebenen Leichtwasserreaktoren. Hier wurde als Moderator Graphit verwendet. Da die Kettenreaktion nicht gestoppt werden konnte, führte die Energieerzeugung im Reaktor letztendlich zur Kernschmelze, wobei das Graphit dann brannte und Rauchgase mit radioaktiven Partikeln in große Höhen gelangten.

Nach Aussagen von Sicherheitsexperten ist ein solcher Unfall bei deutschen Kernkraftwerken ausgeschlossen.

Nichtsdestoweniger sind die radioaktiven Stoffe, die ein Reaktor in Deutschland beherbergt, die gleichen wie die des Unglücksreaktors von Tschernobyl. Weiterhin muß man bedenken daß in einem Kernkraftwerk je Megawatt Leistung jährlich die gleiche Menge an Radioaktivität freigesetzt wird wie bei der Hiroshima-Bombe. Ein wesentlicher Sicherheitsaspekt der Kraftwerkstechnik ist deshalb der **sichere Einschluss** des radioaktiven Materials, das unter keinen denkbaren Umständen in die Umwelt gelangen darf.

### 3.4.1 Barrierenkonzept

Um diesen sicheren Einschluss auch im ungünstigsten Fall gewährleisten zu können, sind mehrere Barrieren zwischen den radioaktiven Stoffen und der Umwelt errichtet, so daß diese Stoffe auch dann zurückgehalten werden, wenn einzelne Barrieren versagen sollten. Man unterscheidet sechs Barrieren (Abb.23 und 24).

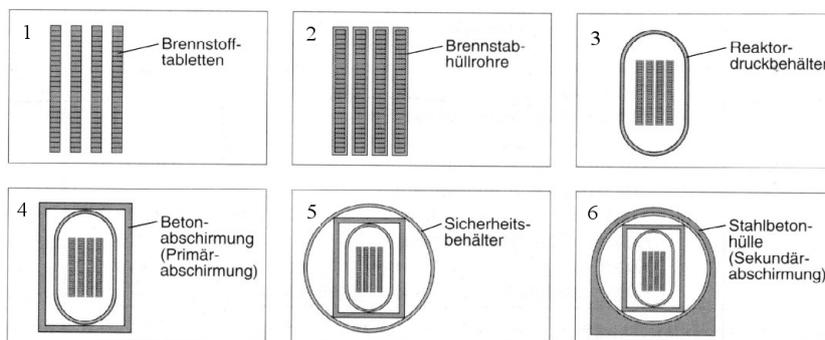
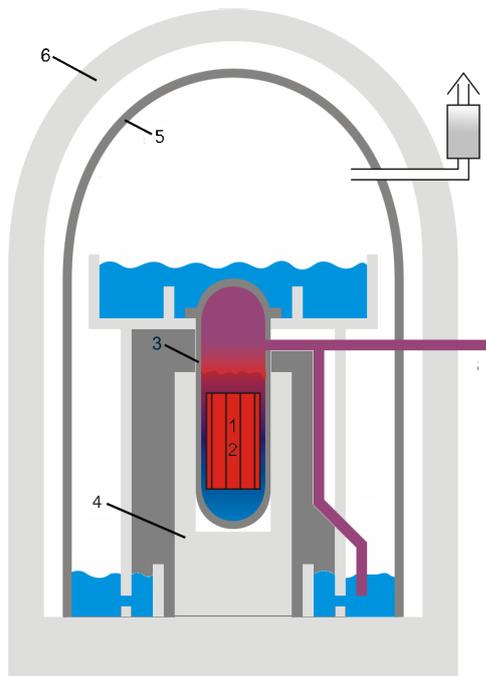


Abb.23: Sicherheitsbarrieren



1. Das **Kristallgitter des Brennstoffs** Uran-dioxyd verhindert bereits ein Austreten der Spaltprodukte.
2. Die **Hüllrohre der Brennstäbe** aus 0,6 mm starkem Zirkaloy umschließen den Brennstoff gasdicht.
3. Der **Reaktordruckbehälter** aus 20 cm dickem Stahl enthält den **Reaktorkern** (uranhaltige Brennelemente und Regelstäbe).
4. Der **biologische Schild** (Primärabschirmung) (Abb.25), ein Betonfundament in dem der Reaktordruckbehälter sitzt.
5. Der **Sicherheitsbehälter** (Containment), ein 3 bis 4 cm dicker Stahlbehälter, der den Reaktordruckbehälter und die unmittelbar daran angeschlossenen Teile des Kühlkreislaufes umschließt. Er ist ausgelegt für einen Druck von 6,3 bar und Temperatur von 145°C.
6. Die **Stahlbetonhülle** (Sekundärabschirmung), das eigentliche Reaktorgebäude, das aus 1,2 bis 2 m dickem Stahlbeton gebaut ist.



Abb.24: Sicherheit

Abb.25: Biologisches Schild (beim Abbau einer Anlage)

Während des ungestörten Betriebes werden von Kernkraftwerken (Abb.26) kontrolliert geringe Mengen radioaktiver Isotope über Abluft und Abwasser abgegeben.

Den größten Anteil der abgegebenen Radioaktivität macht Krypton-85 aus, das über die Abluft emittiert wird.

Iod 131 wird über Abluft und Abwasser freigesetzt.

Tritium gelangt vorwiegend mit dem Abwasser in die Umgebung.

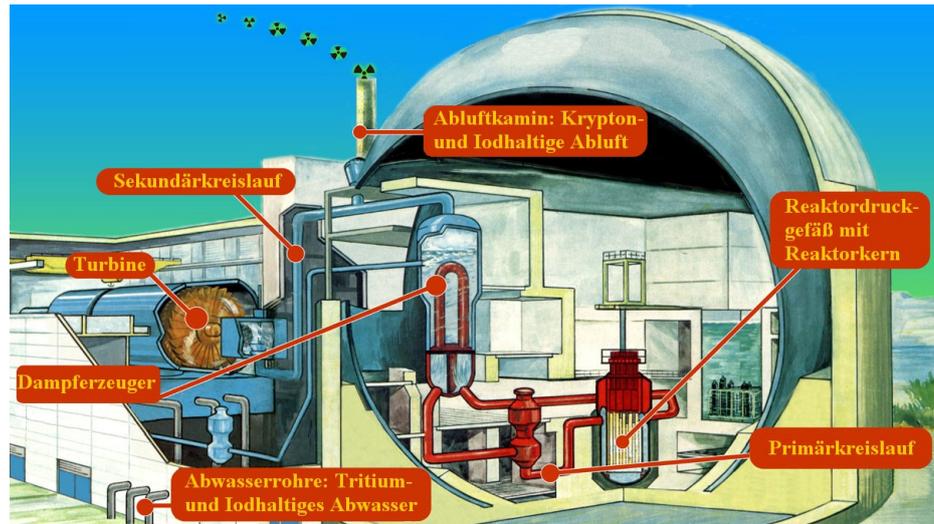


Abb.26: Bauteile und Emissionen von Kernkraftwerken (am Beispiel DWR)

Diese Abgaben müssen unter den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerten liegen, sie werden staatlich überwacht.

Im Vergleich zu der natürlichen und künstlichen radioaktiven Strahlenbelastung sind die Emissionen aus Kernkraftwerken gering.

### 3.4.2 Beherrschung von Störfällen

Während herkömmliche Technik auch dadurch in der Sicherheit optimiert wird, indem man aufgetretene Schadensfälle analysiert und daraus neue Erkenntnisse gewinnt, ist ein solches Vorgehen bei der Kerntechnik nicht möglich. Hier muß von vornherein dafür gesorgt werden, dass Störungen, die sich trotz aller Vorsorge nicht völlig ausschließen lassen, sicher beherrscht werden können.

Nachdem eine nukleare Explosion bei Leichtwasserreaktoren aus physikalischen Gründen ausgeschlossen ist, gilt als **größter anzunehmender Unfall (GAU)** eines Leichtwasserreaktors der **Kühlmittelverlust im Primärkreislauf**. Dieser könnte beispielsweise durch einen Rohrbruch im Kühlmittelkreislauf entstehen, so daß das Wasser ausdampft. Zwar kämen damit auch die Kettenreaktion und weitere Kernspaltungen zum Erliegen, jedoch produzieren die radioaktiven Spaltstoffe so viel Nachwärme, daß der Reaktorkern sich immer weiter aufheizen und schließlich schmelzen (Kernschmelze) würde, wenn diese Nachwärme nicht abgeführt werden kann. Im schlimmsten Fall würde die Kernschmelze die Barrieren überwinden und die radioaktiven Spaltstoffe nach außen gelangen.

Die Sicherheitsmaßnahmen, die ergriffen werden, um die Eintrittswahrscheinlichkeit eines GAUs möglichst gering zu machen, werden auch bei anderen sicherheitssensiblen Bereichen angewandt. Es sind dies:

#### Redundanz

Wichtige Systeme (z.B. Pumpen oder Ventile) sind mehrfach vorhanden. Es steht auch dann noch ein System bereit, wenn eines ausfällt und das andere gerade in Reparatur ist. Diese Methode verwendet man auch in anderen Technikbereichen, so haben Autos Zweikreisbremssysteme. Die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Systeme oder noch mehr gleichzeitig versagen, ist wesentlich geringer als die Versagenswahrscheinlichkeit eines Systems.

#### Diversität

Die mehrfach vorhandenen Systeme werden mit unterschiedlichen Funktionsweisen versehen (z. B. elektrisch, mechanisch). Fällt die Stromversorgung aus, so würde es nichts nützen, doppelt ausgelegte elektrisch betriebene Kühlmittelpumpen zur Verfügung zu haben.

#### Räumliche Trennung

Wichtige Sicherheitssysteme werden in Kernkraftwerken räumlich getrennt ausgeführt. Dies verhindert, dass bei Störfällen wie z.B. einem Brand, einer Explosion oder einem Flugzeugabsturz alle Sicherheitssysteme zugleich beschädigt werden.

### Fail-safe

Dieses Prinzip bedeutet daß die Systeme bei Fehlern immer auf Nummer sicher gehen: kein Zögern, keine Risiken. So wird beispielsweise im Falle eines Stromausfalls (Abb.27) automatisch eine Hydraulik wirksam, die die Regelstäbe in den Reaktor einfährt. Dadurch wird die Kettenreaktion unterbrochen.

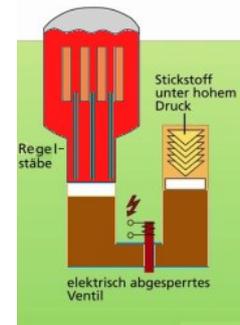


Abb.27: Beispiel Fail-safe-Prinzip

Damit sind nur die wichtigsten Punkte der Sicherheitskonzeption in deutschen Kernkraftwerken angesprochen. Es wurden ausführliche Sicherheitsstudien und Störfallsimulationen durchgeführt, um die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines großen Störfalls zu minimieren.

Insgesamt gilt die Technik der Leichtwasserreaktoren als ausgereift und sicher.

Absolute Sicherheit ist prinzipiell nicht möglich.

## 3.5 Entsorgung

Die Versorgung von Kernkraftwerken mit Kernbrennstoffen, die von der bergmännischen Gewinnung über die Aufbereitung des Uranerzes und die Anreicherung des Natururans bis zur Brennelementeherstellung reicht, ist weiter oben kurz skizziert worden. Dieser Versorgung steht die Entsorgung gegenüber. Darunter versteht man alle Maßnahmen, die zur Aufbewahrung der aus gedienten Brennelemente und der radioaktiven Abfallstoffe ergriffen werden.

Die während des Betriebes eines Reaktors entstehenden Spaltprodukte wirken zum Teil als starke Neutronenabsorber; man nennt sie, wie weiter oben bereits ausgeführt, Reaktorgifte. Deshalb müssen die Brennelemente bereits ausgewechselt werden, wenn noch spaltbares U 235 enthalten ist. Zusätzlich ist in den Brennstäben weiteres spaltbares Material vorhanden, nämlich das durch Brutreaktionen entstandene Pu 239. Man bezeichnet die zur Auswechslung anstehenden Brennelemente in Anlehnung an konventionellen Brennstoff als abgebrannt.

Bei einem LWR mit 1000 MW elektrischer Leistung fallen pro Jahr ca. 20 t abgebrannter Brennelemente an, die entsorgt werden müssen. Diese hochradioaktiven Brennelemente enthalten viele radioaktive Spaltprodukte mit kurzer Halbwertszeit. Deshalb werden sie nach der Entnahme aus dem Reaktorkern zunächst in einem mit Wasser gefüllten Abklingbecken längere Zeit im Kernkraftwerk zwischengelagert. In dieser Zeit nimmt die Radioaktivität ab, die langlebigen radioaktiven Substanzen bleiben natürlich erhalten. Die radioaktiven Stoffe produzieren Wärme, die abgeführt werden muß.

### 3.5.1 Wiederaufarbeitung

Da die abgebrannten Brennelemente einen höheren Anteil spaltbaren Materials enthalten als beispielsweise Natururan, liegt der Gedanke nahe, die Brennelemente nicht sofort endzulagern, sondern die enthaltenen Spaltstoffe wieder zu verwenden. Die oben dargestellte Brütertechnologie macht überhaupt nur Sinn, wenn die erbrüteten Spaltstoffe in anderen Reaktoren wiederverwendet werden. Der Prozess, der aus den abgebrannten Brennelementen die Spaltstoffe extrahiert und sie wieder der Brennelementeherstellung zugänglich macht, wird als Wiederaufarbeitung bezeichnet.

Wiederaufarbeitungsanlagen (WAA) arbeiten mit dem so genannten PUREX-Verfahren. (PUREX = Plutonium-Uranium-Recovery by Extraction). Bei diesem Verfahren erfolgt die Wiederaufarbeitung in drei Prozessschritten:

1. Die Brennelemente werden in ca. 5 cm lange Teile zersägt und in konzentrierte Salpetersäure gegeben. Dadurch gehen die Inhalte der Brennstäbe in Lösung, während die Legierung der Hüllrohre erhalten bleibt.
2. Uran und Plutonium werden von den in der Lösung verbleibenden Spaltprodukten getrennt. Die hochradioaktiven Spaltprodukte werden verfestigt, in Glas eingeschmolzen und in dicht schließende Edelstahlzylinder eingeschlossen, die mittlerradioaktiven mit Beton ummantelt.
3. Das extrahierte Uran und Plutonium werden getrennt und so aufbereitet, daß sie in der Brennelementefertigung weiterverarbeitet werden kann.

Die Wiederaufarbeitung ist chemische Verfahrenstechnik mit konzentrierten Säuren, wie sie auch in der Großchemie angewandt wird, hinzu kommt allerdings, daß es sich um hochradioaktive Stoffe handelt; man spricht deshalb auch von heißer Chemie. WAA sind ebenso wie schnelle Brüter im militärischen Bereich seit langer Zeit

in Betrieb. Frankreich und England betreiben die zivile Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente in großem Stil, in diesen Ländern lassen auch deutsche Kernkraftwerksbetreiber Brennelemente wiederaufarbeiten.

Die sogenannten Castor-Transporte (von Brennelementen) zwischen La Hague und dem Zwischenlager Gorleben werden immer von heftigen Demonstrationen (Abb.28) seitens der Atomkraftgegner begleitet.

Deutschland selbst hat sich aus der Wiederaufarbeitung verabschiedet. Zwar ist sie in einer Versuchsanlage in Karlsruhe erfolgreich erprobt worden. Der Bau der in Wackersdorf (Bayern) geplanten nationalen WAA ist jedoch nicht zuletzt wegen anhaltender massiver Proteste eingestellt worden.



Abb.28: Demo gegen den Transport von Brennelementen

Als Vorteile der Wiederaufarbeitung können angeführt werden:

- bessere Ausnutzung der Spaltstoffressourcen; es werden etwa 30 % neuer Spaltstoffe durch die Wiederaufarbeitung eingespart,
- Vernichtung des gefährlichen und langlebigen Plutoniums durch Spaltung.
- Komprimierung der endzulagernden hochradioaktiven Abfälle.

### 3.5.2 Endlagerung

Ob mit oder ohne Wiederaufarbeitung: Bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie bleiben hochradioaktive Stoffe zurück, die für viele Generationen (mehrere Jahrhunderte lang) absolut sicher aus der Biosphäre (gesamter Lebensraum, also Erde, Wasser und Luft) ferngehalten werden müssen; man nennt dies Endlagerung. Werden die Brennelemente ohne zwischengeschaltete Wiederaufarbeitung endgelagert, so spricht man von direkter Endlagerung.

Während schwach- und mittlradioaktive Abfälle in Deutschland routinemäßig in stillgelegten Bergwerken eingelagert werden, ist die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle erst in der Erprobung. Vorgesehen ist die Einlagerung in Salzstöcken, Ton- oder Granitformationen. Um die sichere Endlagerung für derart lange Zeiträume zu gewährleisten, müssen die Endlagerstätten eine Reihe von Anforderungen erfüllen:

- geologische Stabilität,
- keine Verbindung zum Grundwasser,
- ausreichende Tiefe,
- gute Wärmeleitfähigkeit.

Derzeit werden Salzstöcke in Norddeutschland, beispielsweise in Gorleben, für die Endlagerung des radioaktiven Atom Mülls favorisiert, da sie die oben genannten Anforderungen am besten erfüllen: Die Salzstöcke sind seit vielen Millionen Jahren stabil, sie haben keine Verbindung zum Grundwasser und besitzen ausreichende Tiefe.

Da die hochradioaktiven Abfälle Wärme produzieren, muß diese Wärme abgeleitet werden, um Überhitzungen der Ummantelung zu vermeiden. Salzstöcke weisen eine gute Wärmeleitfähigkeit auf.

In Finnland ist seit 1992 das Endlager Olkiluoto für schwach- und mittlradioaktive Abfälle in Betrieb. Es ist in granitem Gestein gebaut. Zurzeit wird dort ein Endlager für hochradioaktive Abfälle errichtet.

Obwohl es üblich ist, im Umgang mit nuklearen Brennstoffen von einem Brennstoffkreislauf (Abb.29) zu sprechen, muss angemerkt werden, daß es einen **Kreislauf** nur dann **ansatzweise** gibt, wenn Brennelemente wiederaufgearbeitet werden.

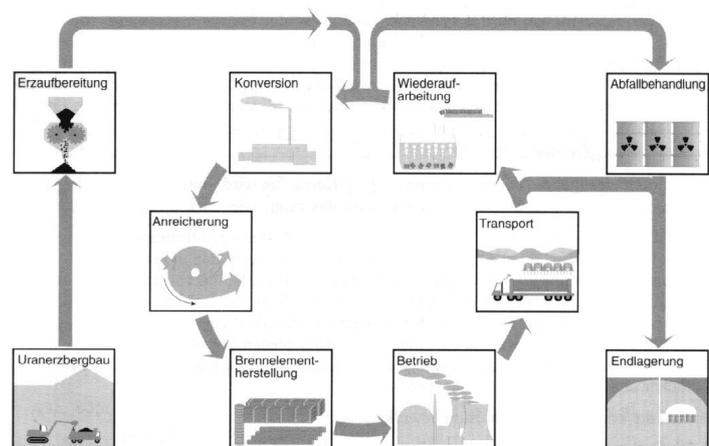


Abb.29: Nuklearer Brennstoffkreislauf

Beim Weg der direkten Endlagerung ist keinerlei Kreislauf mehr vorhanden: Die Rohstoffe werden der Erde entnommen und die Abfallstoffe wieder in der Erde vergraben, eine Wiederverwendung im Sinne einer Kreislaufwirtschaft existiert ebenso wenig wie bei den fossilen Brennstoffen.



## E Energie und Umwelt

Jede der großtechnischen Energiewandlungsketten, sei sie fossil oder nuklear, entnimmt der Erdkruste erschöpfliche Energierohstoffe (Kohlen, Erdöl, Erdgas, Natururan) und wandelt sie in mehreren Stufen unter relativ großen Verlusten in Nutzenergie um. Da Energieträger stoffgebunden sind, fallen bei den Umwandlungen beträchtliche Mengen von Rest- und Schadstoffen an.

Die gegenwärtigen Energieversorgungssysteme setzen Schadstoffe an die Umwelt frei. Diese sogenannten **Emissionen** führen zu beträchtlichen Umweltbelastungen.

### 1 Überblick

Die Abb.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Emissionen der Energiewandlungssysteme.

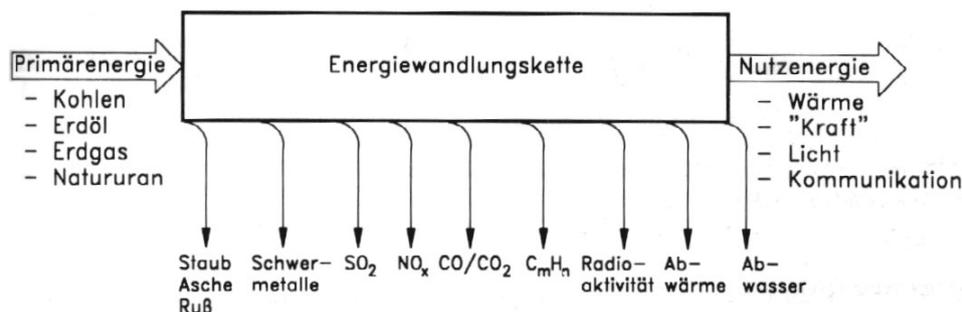


Abb.1: Energie-wandlungskette

Die emittierten Stoffe reagieren zum Teil mit den Stoffen aus der Umwelt (z. B. mit dem Luftsauerstoff) und werden dadurch umgewandelt. Es entstehen komplexe, teilweise noch wenig erforschte Umwandlungsketten.

Diese Schadstoffe wirken schädlich auf

- Menschen: Atemwegserkrankungen, Krebs;
- Tiere und Pflanzen: Fischsterben in verschmutzten oder sauren Gewässern, Waldsterben;
- Sachgüter: Schäden an Bauwerken, insbesondere an historischen.

Die Schadstoffe, welche im Bereich von Menschen, Tieren, Pflanzen und Sachgütern niedergehen, nennt man **Immissionen**. Aufgrund von Transportmechanismen finden die Immissionsrate oft weit entfernt von den Emissionen statt. Je nach Wetterbedingungen kann deshalb die Immissionsrate sehr unterschiedlich sein. Schadstoffe sind grenzüberschreitend, weshalb eine nationale Lösung nicht erfolgreich sein kann. Gemessen werden die Immissionen gewöhnlich in Milligramm Schadstoff pro Kubikmeter Luft, beispielsweise 120 mg/m<sup>3</sup> Ozon.

## 2 Luftschadstoffe

### 2.1 Entstehung und Wirkung

Da zur Zeit der größte Teil unserer Nutzenergie durch die Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Öl und Erdgas gewonnen wird, sind die dabei in großen Mengen emittierten Luftschadstoffe von besonderer Bedeutung. Würden die eingesetzten fossilen Primärenergieträger nur aus Kohlenstoff (Kohle) bzw. Kohlenwasserstoffen (Öl, Gas) und die Reaktionspartner aus reinem Sauerstoff bestehen, erhielte man bei vollständiger Verbrennung nur Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf als Rückstände.



Die fossilen Primärenergieträger enthalten jedoch eine Vielzahl von zusätzlichen Stoffen. Zudem ist nicht reiner Sauerstoff Reaktionspartner, sondern in der Regel Luft.

Welche bzw. wie viel Emissionen bei der Verbrennung auftreten, hängt ab von

- der chemischen Zusammensetzung der Energieträger
- dem Verbrennungsprozess (vollständige oder unvollständige Oxidation des Kohlenstoffs)
- der Verbrennungstemperatur
- nachgeschalteten Verfahren zur Abgasreinigung.

Die wichtigsten Luftschadstoffe, die bei der Verbrennung entstehen, sind:

- Staub,
- Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ),
- Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ),
- Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und
- Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_m\text{H}_n$ ).

Hierzu ist anzumerken, dass Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) kein Schadstoff ist.

In Abb.2 sind Entstehung, Wirkungen und technische Maßnahmen (zur Rückhaltung bzw. Umwandlung) bezüglich der Luftschadstoffe zusammengefaßt.

	Entstehung	Wirkungen	Techn. Maßnahmen
Staub	Stäube bestehen aus nicht brennbaren Feststoffpartikeln. Sie entstehen bei Verbrennungsprozessen, insbesondere bei der Verbrennung in Kohlekraftwerken, und in stoffintensiven Industriebetrieben, wie beispielsweise in der Zementindustrie.	Stäube lagern sich in den Atemwegen bis hin zur Lunge ab. Sie führen deshalb vermehrt zu Erkrankungen der Atmungsorgane wie z. B. zu Asthma. Zudem sind Staubpartikel die Träger der anderen Luftschadstoffe, da diese sich auf den Staubteilchen ablagern. Das gilt besonders für $\text{SO}_2$ .	Mit Hilfe von Filtern (mechanischen und/oder elektrostatischen) werden in Industriebetrieben und Kraftwerken die Stäube und auch Ruß abgeschieden. Dabei werden Entstaubungsraten von über 99% erzielt. Feinstäube können jedoch nur mit geringerem Prozentsatz zurückgehalten werden.
$\text{SO}_2$	Schwefel ist in den Kohlen und im Erdöl enthalten. Braunkohle hat mit Schwefelanteilen von bis zu 4% besonders hohe Schwefelgehalte. Bei der Verbrennung dieser Stoffe entsteht das gasförmige Schwefeldioxid $\text{SO}_2$ . In feuchter Luft entstehen daraus feinstverteilte Tröpfchen Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) die Luft anreichern. Hauptverursacher sind Kohlekraftwerke.	$\text{SO}_2$ ist ein Reizgas, das auf Schleimhäute und Atemwege des Menschen wirkt. Es trägt wesentlich zur Smogbildung in der kalten Jahreszeit bei. Zudem entsteht daraus schweflige Säure und Schwefelsäure, die ursächlich für den „sauren Regen“ sind, der zu einer Übersäuerung von Boden und Gewässern führt, Bäume schädigt und den Steinfraß an Gebäuden bewirkt.	Es können schwefelarme (leichtes Heizöl, Dieseldieselmotoren) oder schwefelfreie (Erdgas) Brennstoffe verwendet werden. Die Brennstoffe können vor der Verwendung entschwefelt werden (Benzin). In Kohlekraftwerken werden die Rauchgase entschwefelt. Dazu sind technisch aufwendige Verfahren entwickelt und nachgerüstet worden (Abschnitt 3.1 Rauchgasentschwefelung)
$\text{CO}$	Kohlenstoffmonoxid entsteht durch unvollständige Verbrennung und bei Verbrennung unter Sauerstoffmangel. Verbrennungsmotoren und Haushaltsheizungen sind die Hauptquellen des giftigen Gases. Besonders die explosionsartige Verbrennung des Ottomotors hat CO-Bildung zur Folge. In der Atmosphäre oxidiert CO zu $\text{CO}_2$ .	CO verbindet sich anstelle von Sauerstoff mit dem Blutfarbstoff Hämoglobin und behindert damit den Sauerstofftransport im Blut. Es führt bei geringerer Konzentration zu Kopfschmerzen und Übelkeit, bei höheren Konzentrationen zu Atemlähmung und Tod.	Bei kontinuierlich brennenden Feuerungsanlagen kann durch ausreichende Luft- bzw. Sauerstoffzufuhr die Entstehung von CO unterbunden werden. Beim Ottomotor wird durch den Einsatz des Dreiwegekatalysators der CO-Ausstoß um über 90% verringert, indem im Katalysator CO zu $\text{CO}_2$ umgewandelt wird (Abschnitt 3.2 Dreiwegekatalysator).

Abb.2 Teil 1: Wichtigste Luftschadstoffe

	Entstehung	Wirkungen	Techn. Maßnahmen
NO <sub>x</sub>	Bei hohen Temperaturen verbinden sich die in der Luft enthaltenen Sauerstoff- und Stickstoff-Moleküle zu NO und NO <sub>2</sub> (man faßt diese beiden Stickoxide mit der Formel NO <sub>x</sub> zusammen). Die Hauptlieferanten sind neben den Kohlekraftwerken die Verbrennungsmotoren der Autos. Die Stickoxide und ihre Folgeprodukte können in der Luft mehr als 100 km weit transportiert werden.	Auch die Stickoxide beeinträchtigen die Atemwege des Menschen und verstärken die Wirkung des SO <sub>2</sub> . Sie sind wesentlich an der Ozonbildung (O <sub>3</sub> ) im Hochsommer beteiligt, indem sie bei Sonneneinstrahlung in der Atmosphäre komplexe fotochemische Reaktionsketten auslösen. Dabei entstehen neben dem O <sub>3</sub> weitere Radikale, die ihrerseits zu chemischen Reaktionen führen.	Die Stickoxidbildung kann durch Absenkung der Verbrennungstemperaturen verringert werden, wodurch allerdings auch der Wirkungsgrad sinkt. Ferner werden katalytische Verfahren zur Rauchgasentstickung in Kraftwerken eingesetzt. Beim Ottomotor werden mit dem schon erwähnten Dreiwegekatalysator auch die Stickoxide mit hohen Umwandlungsraten zu N <sub>2</sub> reduziert.
C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	Unter dem Begriff Kohlenwasserstoffe werden alle Verbindungen aus Kohlen- und Wasserstoff zusammengefaßt und mit der Formel C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> (z.B. CH <sub>4</sub> für Methan) bezeichnet. Sie sind in den aus Erdöl und Erdgas gewonnenen Produkten enthalten. Bei unvollständiger Verbrennung, hauptsächlich in Verbrennungsmotoren, und bei Lösemittelverwendung sowie an Tankstellen werden sie in großen Mengen an die Luft abgegeben.	Bei einigen Kohlenwasserstoffen (z. B. bei Benzol) ist eine krebs-erregende Wirkung nachgewiesen. Bereits beim Einatmen geringer Mengen dieser Krebs erregenden Stoffe muss langfristig ein erhöhtes Krebsrisiko befürchtet werden.	Die in den Abgasen der Ottomotoren enthaltenen Kohlenwasserstoffe werden ebenfalls mit dem Dreiwegekatalysator zu Kohlendioxid und Wasser verbrannt und damit weitgehend reduziert. Das Ausdampfen von Kohlenwasserstoffen in die Atmosphäre an Tankstellen und bei Lösemittelanwendungen kann durch Absaugvorrichtungen verringert werden.

Abb.2 Teil 2: Wichtigste Luftschadstoffe

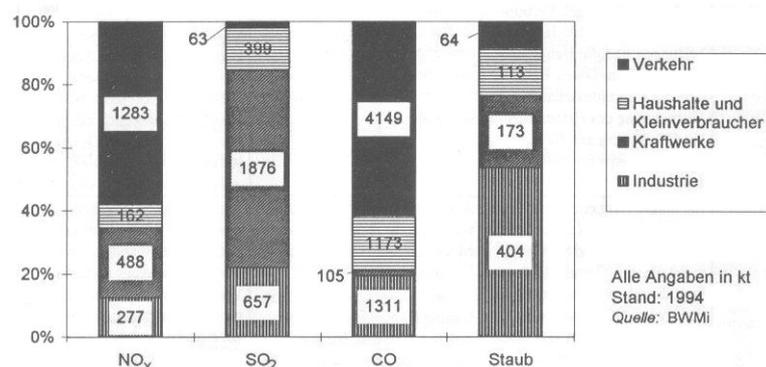
## 2.2 Emittenten

Als **Emittenten** bezeichnet man die Verursacher von Emissionen.

Um sinnvolle Maßnahmen zur Luftreinhaltung durchführen zu können, muß man wissen, aus welchen Quellen die Luftschadstoffe emittiert werden.

In Abb.3 sind Emittenten und Luftschadstoffe am Beispiel von Deutschland, dargestellt

Abb.3: Emittenten von Luftschadstoffen



Die Abbildung zeigt, daß der Verkehr, und das betrifft in erster Linie den Straßenverkehr, der Hauptemittent bei den Luftschadstoffen CO und NO<sub>x</sub> ist. Wir alle können sehr einfach zur Absenkung dieser Emissionen beitragen, indem wir weniger mit dem Auto fahren.

Die SO<sub>2</sub>-Emissionen stammen hauptsächlich aus Kraftwerken.

### 3 Maßnahmen zur Luftreinhaltung

Die Umweltpolitik hat erkannt, daß zum Schutze von Menschen, Tieren, Pflanzen und Sachgütern der zunehmenden Luftverschmutzung entgegengewirkt werden muss.

So wurden seit Mitte der 70er Jahre Immissionsschutzgesetze erstellt, die Grenzwerte für die verschiedenen Luftschadstoffe festlegen.

Parallel dazu wurde ein nahezu flächendeckendes Meßwerterfassungssystem für Schadstoffemissionen aufgebaut. Nur wenn die Schadstoffkonzentrationen auch gemessen werden können, macht es Sinn, Grenzwerte festzulegen und ihre Einhaltung zu überprüfen.

Die Grenzwerte werden von Zeit zu Zeit neuen technischen und medizinischen Erkenntnissen angepasst und verschärft.

Bei Überschreitung der zulässigen Grenzwerte sind staatliche Zwangsmaßnahmen wie beispielsweise Fahrverbote oder Produktionsstopps von Fabriken möglich.

Zusätzlich wurden verstärkt technische Maßnahmen (siehe nächste Abschnitte) ergriffen, um die lufthygienische Situation zu verbessern.

#### 3.1 Rauchgasentschwefelung

Um die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte für Schwefeldioxidemission einzuhalten, müssen neu errichtete Kohlekraftwerke mit Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) gebaut werden. Bestehende Anlagen werden damit nachgerüstet.

Nachrüsten bzw. Bauen von Rauchgasentschwefelungsanlagen in Steinkohlekraftwerken erfordert sehr hohe Investitionen, da es sich um recht große Anlagen handelt.

Durch diese Maßnahmen konnten im Vergleich zur Mitte der 80er Jahre die emittierten  $\text{SO}_2$ -Mengen aus Kraftwerken um 95% reduziert werden.

Desweiteren wurden Katalysatoren zur Rauchgasentstickung installiert. Die aus Kraftwerken emittierten Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) betragen weniger als 25% der Menge, die vor 10 Jahren freigesetzt wurde.

Es gibt verschiedene Verfahren zur Rauchgasentschwefelung. In Deutschland wurde überwiegend das Naßverfahren auf Kalk-/Kalksteinbasis (Abb.4) verwendet.

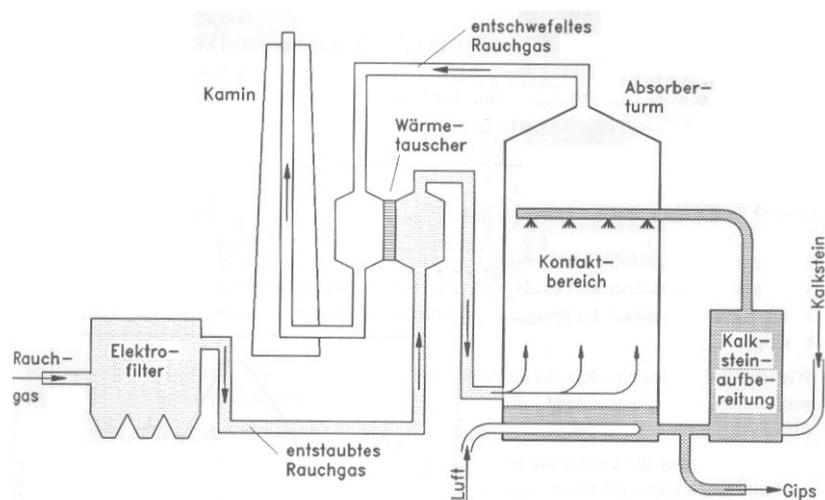


Abb.4: Rauchgas-  
entschwefelungsanlage

#### Naßverfahren auf Kalk-/Kalksteinbasis:

Die Steinkohle enthält 1 bis 2% Schwefel. Dieser oxidiert beim Verbrennen der Kohle zu gasförmigen  $\text{SO}_2$ , das man demzufolge in den sogenannten **Rauchgasen** der Feuerungsanlage vorfindet.

Die Rauchgase werden als erstes entstaubt, indem sie durch einen Elektrofilter strömen.

Dann werden die Rauchgase in einem Wärmetauscher von ca. 140 °C auf etwa 50 °C abgekühlt.

Sie gelangen dann in einem **Absorberturm**, in dem die Entschwefelung stattfindet. Dem Absorberturm wird von oben Kalkstein  $\text{CaCO}_3$  zugeführt, der zuvor in einer **Kalksteinaufbereitungsanlage** feingemahlen und mit Wasser aufgeschlämmt wurde. Diese Kalkaufschlämmung wird den aufsteigenden Rauchgasen entgegengesprüht. Im Kontaktbereich reagiert das Schwefeldioxid mit der Kalklösung zu Calciumsulfit  $\text{CaSO}_3$  und Kohlendioxid  $\text{CO}_2$ .



Mehr als 85 % des enthaltenen  $\text{SO}_2$  kann herausgewaschen werden.

Das anfallende Calciumsulfit wird dann zu Calciumsulfat (= Gips) oxidiert. Gips ist schwerlöslich, er fällt aus der Flüssigkeit aus, wird entwässert und getrocknet. Er wird größtenteils in der Baustoffindustrie verwendet.

Die entstaubten und entschwefelten Rauchgase werden getrocknet. Im Wärmetauscher werden sie auf höhere Temperaturen erwärmt und abschließend über den Schornstein freigesetzt. Sie steigen hierbei zu höheren Luftschichten auf.

### 3.2 Abgaskatalysatoren

Bei Verbrennungsmotoren mit innerer Verbrennung (Otto-, Dieselmotor ...) wird ein Kraftstoff-Luft-Gemisch verbrannt. Die Abgase dieser Verbrennungsmotoren enthalten neben den Verbrennungsprodukten verschiedene Luftschadstoffe.

Die Konzentrationen der einzelnen Schadstoffe hängt vom Luftverhältnis  $\lambda$  ab, bei dem die Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemisches stattfindet.

Unter dem **Luftverhältnis**  $\lambda$  versteht man das Verhältnis von tatsächlich vorhandener Luftmasse zu (stöchiometrisch) erforderlichen Luftmasse.

$$\lambda = \frac{\text{vorhandene Luftmasse}}{\text{benötigte Luftmasse}}$$

- Bei  $\lambda = 1$  entspricht die zugeführte Luftmenge genau dem stöchiometrischen Verhältnis d.h. es liegt die Luftmenge vor, die zu einer vollständigen Verbrennung benötigt wird.
- Bei  $\lambda < 1$  spricht man von einem **fetten Kraftstoff-Luft-Gemisch**, der Anteil an Kraftstoff ist größer als erforderlich.
- Bei  $\lambda > 1$  ist das **Kraftstoff-Luft-Gemisch mager**, es liegt ein **Luftüberschuß** vor.

In Abb.5 ist die Konzentration der wichtigsten Luftschadstoffe eines Ottomotors in Abhängigkeit vom Luftverhältnis dargestellt.

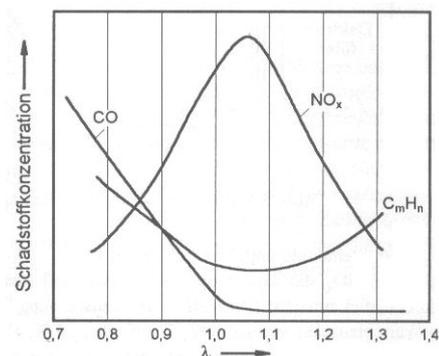


Abb.5: Schadstoffemissionen eines Ottomotors in Abhängigkeit vom Luftverhältnis

Man erkennt daß es kein Luftverhältnis gibt, bei dem alle Schadstoffemissionen minimal sind. Nur durch Einstellen des Luftverhältnisses läßt sich somit keine effiziente Schadstoffreduktion erreichen.

Somit sind andere technische Maßnahmen erforderlich. Katalysatoren stellen hier eine Lösung dar.

**Katalysatoren** sind Stoffe, die durch ihre Anwesenheit chemische Reaktionen ermöglichen oder beschleunigen, ohne sich dabei selbst zu verändern.

### 3.2.1 Ottomotoren

Bei **Ottomotoren** ist der **geregelter Dreivegekatalysator** die zurzeit wirksamste und gängigst verwendete Bauform.

#### Geregelter Dreivegekatalysator:

Der Katalysator wird in die Auspuffanlage eingebaut. Er wird in ein metallisches Katalysatorgehäuse (Abb.6) eingebaut, das Halt und Schutz bietet.

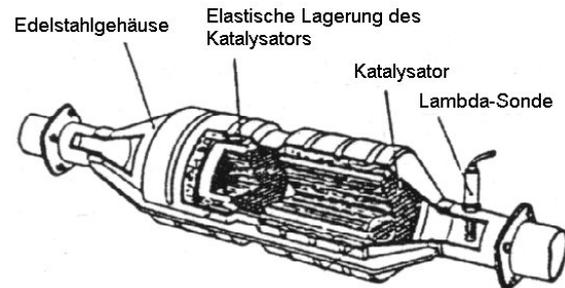
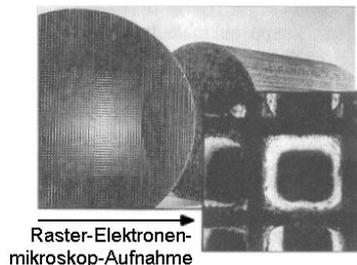


Abb.6: Geregelter Dreivegekatalysator



Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahme

Da die chemischen Reaktionen nur bei Kontakt mit dem Katalysator richtig ablaufen, muß eine möglichst große Katalysatoroberfläche vorhanden sein, an der die Abgase vorbei strömen. Im Katalysatorgehäuse ist daher ein sogenanntes Trägersystem eingebaut. Als Trägersysteme verwendet man wabenförmige Grundkörper aus Keramik (Keramikmonolithe) (Abb.7), die von sehr vielen Kanälen durchzogen sind, oder Metallmonolithe aus dünnen, fein gewellten Metallfolien.

Abb.7: Wabenförmiger Grundkörper (Trägersystem)

Dieses Trägersystem ist mit einer Zwischenschicht, dem „washcoat“ (Abb.8) beschichtet. Diese führt zu der erforderlichen großen Oberfläche (ein Gramm „washcoat“ hat eine Oberfläche von  $25 \text{ m}^2$ ).

Die eigentlichen Katalysatorsubstanzen, Platin und Rhodium, sind großflächig auf diese Zwischenschicht aufgebracht. Es bedarf nur ca. 1 bis 3 g dieser Edelmetalle.

Dabei begünstigt Platin die Oxidationsreaktionen und Rhodium die Reduktionen.

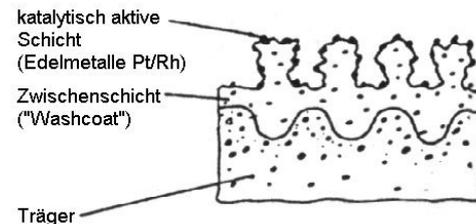


Abb.8: Trägersystem mit Zwischenschicht und Katalysator

Im Dreivegekatalysator laufen gleichzeitig drei Reaktionen ab:

1.  $\text{NO}_x$  wird zu Stickstoff  $\text{N}_2$  reduziert.  
Der freigesetzte Sauerstoff dient dazu,
2.  $\text{CO}$  zu ungiftigen Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  zu oxidieren und
3. die Kohlenwasserstoffe  $\text{C}_m\text{H}_n$  zu Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  und Wasser  $\text{H}_2\text{O}$  zu oxidieren.

Dementsprechend wandelt der Katalysator die giftigen Schadstoffe  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{C}_m\text{H}_n$  in die ungiftigen Ausgangsstoffe  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  um. Man bezeichnet die Vorgänge auch als **Abgasentgiftung**.

#### Konversionsgrad:

Als Maß dafür, wie gut die Abgasentgiftung funktioniert, dient der sogenannte Konversionsgrad. Er hängt von mehreren Parametern ab:

- Der Katalysator braucht eine Mindestbetriebstemperatur ( $> 400 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- Das Luftverhältnis  $\lambda$  muß möglichst genau bei eins liegen. Selbst Abweichungen von nur 1% führen zu schlechteren Konversionsgraden (Abb.9):
  - bei Luftverhältnissen unterhalb eins nimmt der Anteil an Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid stark zu, bedingt durch eine unvollständige Verbrennung,
  - bei Luftverhältnissen oberhalb eins nimmt der Anteil an Stickoxiden stark an, bedingt durch eine heiße Verbrennung.

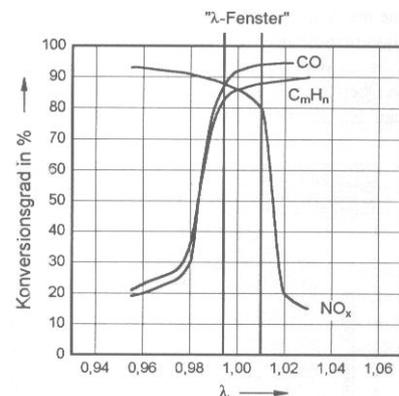


Abb.9: Konversionsgrad

Man erkennt in Abb.9, daß es nur in einem schmalen Bereich, dem sogenannten „ $\lambda$ -Fenster“ möglich ist, für alle drei Schadstoffe einen optimalen Konversionsgrad für erreichen.

Damit bei jedem Betriebszustand des Motors dieses Luftverhältnis bei der Verbrennung vorliegt, muß eine Regelung eingesetzt werden.

**Regeln** bedeutet den Sollwert der Ausgangsgröße fortlaufend mit dem Istwert zu vergleichen und bei Abweichungen die Eingangsgröße so zu verändern, daß Ist- und Sollwert übereinstimmen.

### Lambda-Regelung:

Bei Verbrennungsmotoren wird eine Lambda-Regelung eingesetzt: Als Meßglied wird ein Sensor, die sogenannte Lambda-Sonde, zwischen Motor und Katalysator in die Auspuffanlage eingebaut (Abb.10). Diese Lambda-Sonde mißt als „Istwert“ das Luftverhältnis (genau genommen den Restsauerstoffanteil) im Abgas.

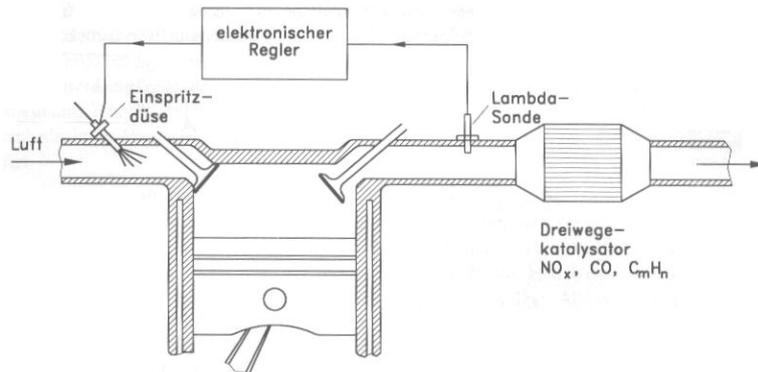


Abb.10: Lambda-Regelung

Ein elektronischer Regler vergleicht den Wert mit dem „Sollwert“  $\lambda = 1$  und verändert den Wert indem die über die Einspritzdüse zugeführte Kraftstoffmenge verändert wird.

Bei Benzinmotoren mit Einspritzanlagen funktioniert die Lambda-Regelung sehr gut:

- mißt die Sonde einen zu großen ist  $\lambda$ -Wert, wird mehr Kraftstoff eingespritzt,
- ist  $\lambda$  zu klein, wird weniger Kraftstoff eingespritzt.

Geregelte Katalysatoren erreichen Konversionsraten von über 90 %. Allerdings nehmen diese mit zunehmenden Alter ab. Außerdem wird der Kraftstoffverbrauch bei Pkws um ca. 5 % erhöht.

Obwohl seit mehreren Jahren alle Neuwagen mit Katalysatoren ausgerüstet werden, sind die Emissionen im Verkehrsbereich nicht in dem Maße verringert worden wie im Bereich der Kraftwerke. Der Grund dafür ist der ständige Anstieg der Anzahl an Kraftfahrzeugen.

### 3.3.2 Dieselmotoren

Die Abgase der Dieselmotoren enthalten die Luftschadstoffe Kohlenstoffmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe ( $C_xH_y$ ), Rußpartikel und Stickoxide ( $NO_x$ ).

#### Kohlenstoffmonoxid und unverbrannte Kohlenwasserstoffe

Da Dieselmotoren ein mageres Gemisch verbrennen, enthalten die Abgase noch Sauerstoff.

Eine Verminderung der Luftschadstoffe **Kohlenstoffmonoxid (CO)** und **unverbrannte Kohlenwasserstoffe ( $C_xH_y$ )** erfolgt daher in einem **Oxidationskatalysator**, (Abb.11) der im Auspuff kurz hinter dem Motor eingebaut wird.

#### Rußpartikel

Im Abgas ist zusätzlich zu den vom Ottomotor bereits bekannten Luftschadstoffen **Kohlenstoff** in Form von **Rußpartikeln** zu finden. Dieser Ruß führt zu den bekannten schwarz qualmenden Abgasen, die man seit jeher von Dieselfahrzeugen kennt, besonders bei kalten Motoren von Personenkraftwagen, bei Lastkraftwagen am Bergantrieb und bei Nutzfahrzeugen.

Heutzutage qualmen Dieselmotoren weniger, weil die Rußpartikel – bedingt durch eine bessere Verbrennung – viel kleiner geworden sind. Ihre Größe beträgt nur ca. 50 bis 200 Nanometer. Dadurch werden sie jedoch nicht mehr von den menschlichen Filterorganen zurückgehalten. Sie sind nun lungengängig, bleiben in der Lunge haften oder gelangen in die Blutbahn. Dies kann zu Allergien, Atembeschwerden und Lungenkrebs führen.

Die seit Anfang der 90er Jahre bekannte Problematik führte bei den einzelnen Automobilherstellern zu verschiedenen Lösungen, um weniger Rußpartikel im Abgas zu haben.

Grundsätzlich werden **Rußpartikelfilter** (Abb.11 und 12) verwendet. Die Partikel in diesen Filtern aus Keramik oder Sintermetall werden gesammelt und in Intervallen von 500 bis 1000 km (wenn der Filter zu ca. 80 Prozent verschmutzt ist, so daß er die Abgase nicht mehr gut durchläßt) verbrannt. Hierzu sind Temperaturen über 550°C erforderlich, die im Abgas (ca. 200°C) nicht vorliegen. Daher bedarf es einer **kurzzeitigen Temperaturerhöhung**, die auf unterschiedliche Weise erreicht wird:

- Manche Hersteller spritzen in das geöffnete Auslaßventil Dieseldieselkraftstoff mit einem **Additiv**, das die Verbrennungstemperatur des Kohlenstoffs im Filter (**FAP – „filtre à particules“** oder **DPF - Dieselpartikelfilter**) auf 450°C heruntersetzt. Durch die Verbrennungssasche des Additivs verstopft der Filter allerdings doppelt so schnell und muß nach ca. 80000 bis 100000 Kilometern gewechselt werden.

Abb.12: Aufbau Rußpartikelfilter

- **DPNR („Diesel Particle  $NO_x$  Reduction“)** ist ein kombiniertes Verfahren für Ruß- und Stickoxidverminderung (siehe auch nachfolgenden Abschnitt zur Stickoxid-Problematik). Hierbei wird ein Keramikbehälter mit einem Katalysator (Edelmetall) und einer Speichermasse eingesetzt. Das Kraftstoff-Luft-Gemisch wird bei entsprechender Beladung des Katalysators (ca. alle 10 Kilometer) kurzzeitig angefettet.
- Beim **D-Cat-System („Diesel Clean Advanced Technology“)** werden durch eine Nacheinspritzung in den Abgaskrümmer kurzzeitig eine Abgastemperatur von über 600°C erreicht, so daß der Ruß im Filter zu Kohlenstoffdioxid oxidiert.

Allgemein kann man sagen, daß durch diese Maßnahmen die Masse an Rußpartikeln bei 80 000 Kilometer von ca. 3 Kilogramm auf ca. 100 Gramm verringert wird. Dies entspricht der Nachweisgrenze von 1 Milligramm pro gefahrenem Kilometer.

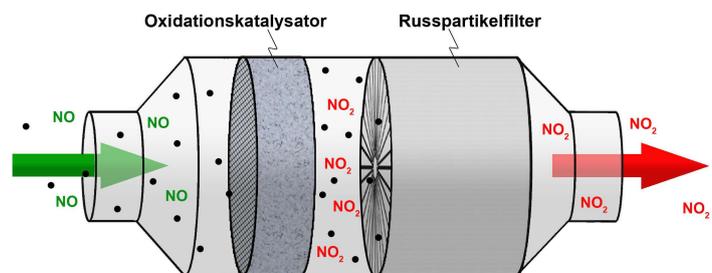


Abb.11: Oxidationskatalysator mit Rußpartikelfilter



### Stickoxide

Neben den Rußpartikeln stellen die **Stickoxide**  $\text{NO}_x$  im Dieselaabgas ein Problem dar, dies umso mehr da ihre Konzentration ca. 4-mal höher ist als beim Ottomotor.

#### Frage:

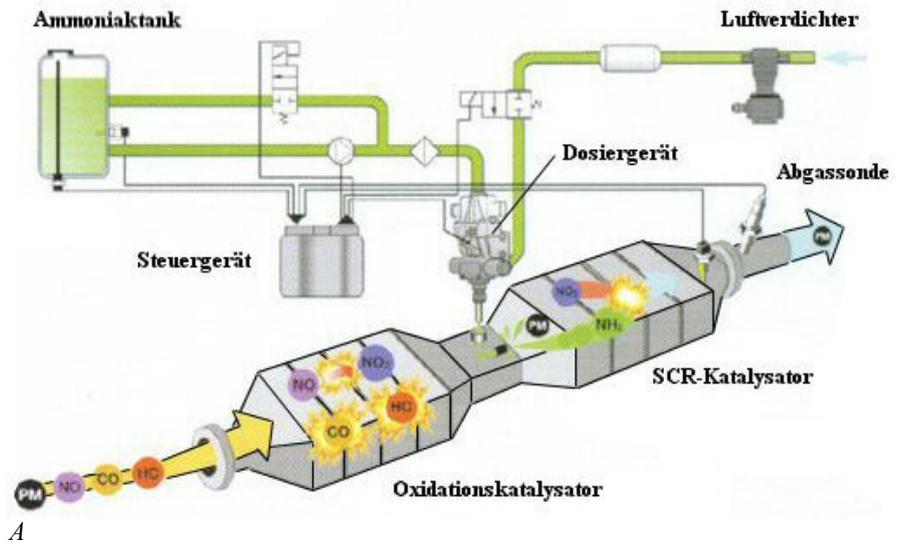
Warum ist die Konzentration höher als bei Ottomotoren?

Auch hier gibt es je nach Hersteller einen anderen Lösungsansatz.

- Bei der **Abgasrückführung** (AGR) wird der Verbrennungsraum des Motors (Zylinder) mit einem Teil der Abgase aufgefüllt. Diese nehmen natürlich nicht mehr an der Verbrennung teil, werden jedoch mit erwärmt. Die Verbrennungstemperaturen bleiben daher geringer, so daß weniger Stickoxide entstehen.
- Beim **D-Cat-System** wird das zurückgeführte Abgas noch gekühlt. In Verbindung mit geregelten Einspritzzeiten und -dauern stellt dieses System zurzeit die effektivste und modernste Abgasbehandlung dar.

- Das **SCR-Verfahren (selektive katalytische Reduktion)** (Abb.13) verwendet Harnstoff aus einem Zusatztank, der in die heißen Abgase eingespritzt wird und zu Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und Wasser zerfällt. Das Ammoniak reduziert die Stickoxide zu Wasser und Stickstoff.

Bei diesem Verfahren muß ein Volumen von ca. 6% des Dieselmotorkraftstoffes an Harnstoff im Auto/LKW mitgeführt werden.



bb.13: SCR-Verfahren (Quelle: HJS)

- Im  **$\text{NO}_x$ -Speicherkatalysator** (Abb.14) werden die Stickoxide, die während der mageren (d.h. sauerstoffreichen Phase) entstehen, aufoxidiert (beispielsweise zu Bariumnitrat) und zwischengespeichert.

Wenn das Speichermaterial gesättigt ist, wird eine kurze, fette Phase ( $\lambda < 1$ , Luftmangel) von 2 bis 10 Sekunden, die Regenerationsphase, eingeleitet. Dabei laufen die chemischen Reaktionen im Katalysator umgekehrt ab, so dass wieder Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe ( $\text{HC}$ ) entstehen. Diese reduzieren die Stickoxide zu Stickstoff.

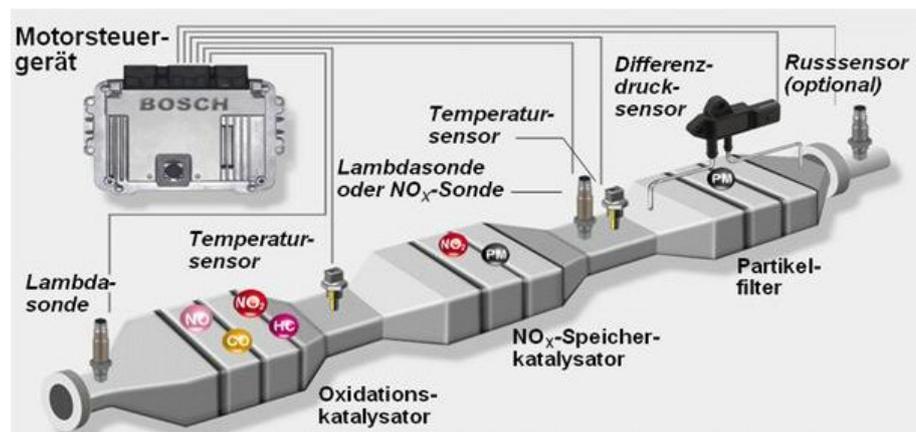


Abb.14: Abgasbehandlung mit  $\text{NO}_x$ -Speicherkatalysator (Quelle: Bosch)

## 4 Treibhauseffekt

Das gasförmige Standardprodukt eines Verbrennungsprozesses mit kohlenstoffhaltigen Brennstoffen, also mit fossilen Energieträgern oder Biomasse, wie z. B. Holz, ist das Kohlendioxid, kurz CO<sub>2</sub>. Lange Zeit wurde dieses Gas für unbedenklich gehalten, da es nicht toxisch (= giftig) und für das Wachstum der Pflanzen sogar nötig ist. Inzwischen weiß man, daß es - bei entsprechender Konzentration in der Atmosphäre - zur Änderung des Weltklimas entscheidend beiträgt.

### 4.1 Natürlicher Treibhauseffekt

Die auf die Erde einfallenden Sonnenstrahlen bestehen aus elektromagnetischen Wellen. Die kurzwelligen Sonnenstrahlen, ihre größte Strahlungsintensität liegt im Bereich des sichtbaren Lichtes, werden von der Atmosphäre weitgehend durchgelassen und erwärmen die Erdoberfläche. Daraufhin werden von der Erde längerwellige Wärmestrahlen, ihre Wellenlänge liegt im unsichtbaren Infrarotbereich, abgegeben. (Abb.15)

Die elektromagnetischen Wellen des Infrarotbereichs können aber die Atmosphäre nicht wieder ungehindert verlassen; sie werden vielmehr von **Spurengasen**, zu denen auch das Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub> gehört, absorbiert. Zwar strahlen die Spurengase die absorbierte Energie wieder ab, allerdings erfolgt dies ungerichtet und damit zum Teil wieder zur Erde zurück.

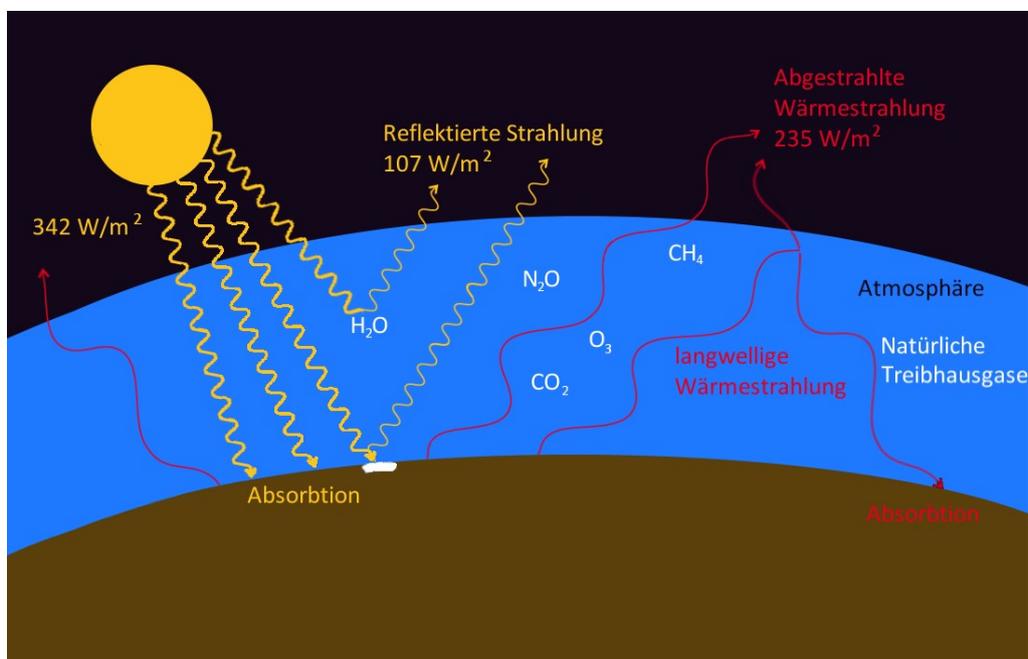


Abb.15: Treibhauseffekt

Die Spurengase haben damit die gleiche Wirkung wie die Glasscheiben eines Treibhauses: Sie lassen einerseits das von außen einfallende kurzwellige Sonnenlicht durch und unterbinden andererseits das Abstrahlen der langwelligen Wärmestrahlung aus dem Inneren des Treibhauses. Dadurch ist es im Inneren wärmer als außerhalb des Treibhauses.

Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt, also ohne Spurengase in der Atmosphäre, wäre es auf der Erde um ca. 33°C kälter. Da die weltweite jährliche Durchschnittstemperatur ca. +15°C beträgt, wäre die Erde mit einer Durchschnittstemperatur von -18°C eine Eiswüste mit Dauerfrost.

Die diesen Treibhauseffekt bewirkenden Spurengase oder Treibhausgase sind in der Atmosphäre nur in geringen Mengen (in Spuren) enthalten:

- Es sind dies hauptsächlich das schon erwähnte Kohlenstoffdioxid, das nur etwa zu 0,03 % in der Luft enthalten ist, und weit weniger bedeutsame Gase wie
- **Distickoxid** (N<sub>2</sub>O),
- **Methan** (CH<sub>4</sub>) und
- **Ozon** (O<sub>3</sub>).
- **Wasserdampf**, der durch Verdunstung in der Atmosphäre gelangt, hat den größten Anteil am natürlichen Treibhauseffekt.

Den wärmespeichernden Effekt des Wasserdampfes kann man leicht beobachten: Während sternenklare Nächte zu einer starken Abkühlung führen, weil die Wärme in den Weltraum abgestrahlt wird, ist die Abkühlung bei wolkenbedecktem Himmel geringer, weil der Wasserdampf in den Wolken die Abstrahlung verhindert.

Der Wärmehaushalt der Erde ist bestimmt durch die Einstrahlung der Sonnenenergie und die Abstrahlung in den Weltraum. Letztlich muss die gesamte eingestrahlte Sonnenenergie wieder in den Weltraum abgestrahlt werden, sonst würde sich die Erde immer weiter aufheizen. Es besteht also ein Strahlungsgleichgewicht. Der Treibhauseffekt bewirkt nur eine Verzögerung der Wärmeabstrahlung, was sich in einer höheren Lufttemperatur niederschlägt.

Alle weiteren Energieumsetzungen, wie etwa die des Menschen oder die Wärme aus dem Erdinneren, sind im Vergleich zu der von der Sonne eingestrahnten Energiemenge vernachlässigbar klein.

Im antarktischen Eis sind Lufteinschlüsse aus weit zurückliegenden Zeiten enthalten. Aus deren Analyse weiß man, dass die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Luft Schwankungen unterworfen war. Es zeigt sich, daß bei Eiszeiten niedrigere  $\text{CO}_2$ -Gehalte vorhanden waren als in Warmzeiten. Das Klima der Erde hängt also in starkem Maße mit den Konzentrationen dieser Spurengase zusammen.

## 4.2 Anthropogener Treibhauseffekt

Neben diesem natürlichen Treibhauseffekt sind es die Aktivitäten des Menschen (Abb.16), die klimarelevante Treibhausgase in die Erdatmosphäre emittieren. Diesen von Menschen verursachten Treibhauseffekt bezeichnet man als **anthropogenen Treibhauseffekt**.

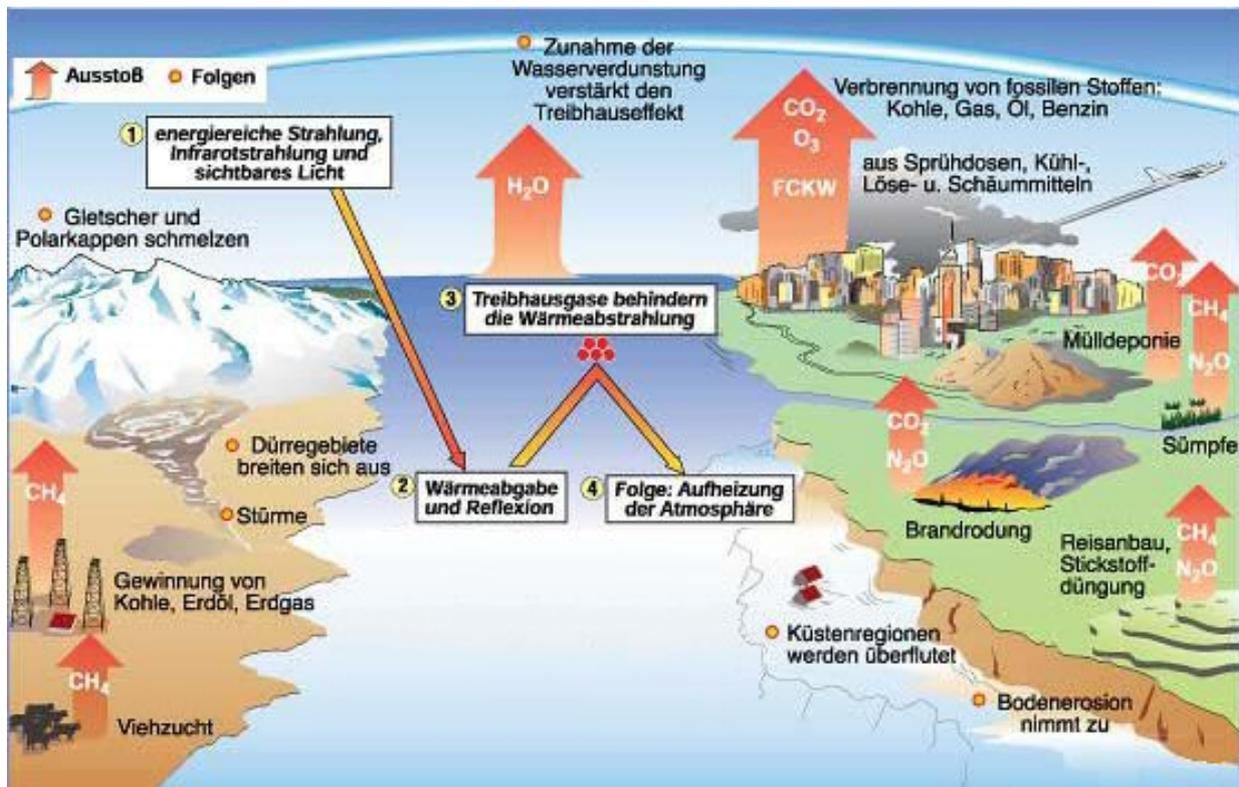


Abb.16: Ursachen für den anthropogenen Treibhauseffekt (Quelle: EEA)

Die Anteile der einzelnen Verursacher am anthropogenen Treibhauseffekt sind in Abb.17 dargestellt.

Dabei steuern die **Emissionen der Energiewandlungssysteme** mit 50 % den größten Anteil zu dem vom Menschen gemachten Treibhauseffekt bei, in erster Linie durch Freisetzung von Kohlenstoffdioxid  $\text{CO}_2$  bei der Verbrennung fossiler Energieträger.

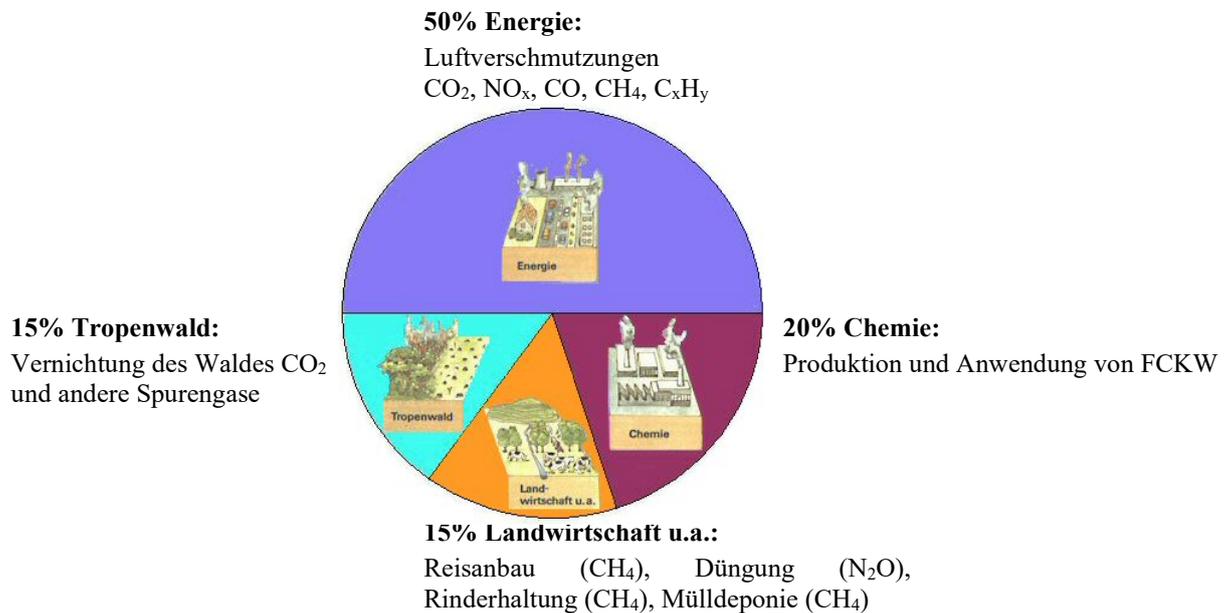


Abb.17: Anteile einzelner Verursacher am anthropogenen Treibhauseffekt

Mit 20 % sind die **Produktion und Anwendung chemischer Produkte** am zusätzlichen Treibhauseffekt beteiligt, insbesondere die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), die als Kühlmittel in Kältemaschinen und zum Aufschäumen von Kunststoffen verwendet werden. Die FCKW-Moleküle zerstören nicht nur die schützende Ozonschicht der Atmosphäre, sie wirken auch als Treibhausgas. Zwar sind die emittierten Mengen im Vergleich zum  $\text{CO}_2$  sehr gering, jedoch haben die FCKW-Moleküle eine um den Faktor 10 000 höhere Treibhauswirkung als die  $\text{CO}_2$ -Moleküle.

Mit immerhin 15 % trägt der **Raubbau an den Tropenwäldern** zum Treibhauseffekt bei. Durch die Brandrodungen wird nicht nur  $\text{CO}_2$  freigesetzt, die Erde verliert damit auch eine  $\text{CO}_2$ -Senke, da die Pflanzen  $\text{CO}_2$  aufnehmen und speichern.

Die restlichen 15 % der anthropogenen Treibhausgase sind hauptsächlich der **Landwirtschaft** zuzurechnen. Durch den Naßfeldreisanbau und durch die Rinderhaltung entsteht Methan  $\text{CH}_4$ , und bei der Düngung wird Distickoxid,  $\text{N}_2\text{O}$ , freigesetzt. Methan wird zusätzlich auch in **Mülldeponien** freigesetzt.

### 4.3 Problem Kohlenstoffdioxid

Das Verbrennen fossiler Energieträger setzt in großen Mengen  $\text{CO}_2$  frei. Auf die einzelnen Emittenten von Kohlenstoffdioxid wurde an früherer Stelle bereits eingegangen, in Abb.18 sind die Verursacher am Beispiel von Deutschland nochmals dargestellt.

Hinzu kommt noch das durch die Brandrodung in den tropischen Wäldern und durch das Verrotten von Biomasse freigesetzte  $\text{CO}_2$ .

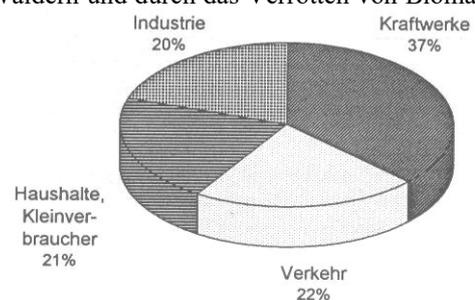


Abb.18: Emittenten von Kohlenstoffdioxid in Deutschland

Dass sich seit der Industrialisierung der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft erhöht, konnte durch Messungen bestätigt werden. Seit der Industrialisierung ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration von etwa 280 ppm auf Wert über 400 ppm angestiegen, also um mehr als 40%. Aufgrund des steigenden Weltenergiebedarfs ist mit einer weiteren Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verbrennen fossiler Energieträger, vor allem in den Entwicklungsländern, und demzufolge mit einer weiteren Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre zu rechnen. Ohne Gegenmaßnahmen ist ein Anwachsen der CO<sub>2</sub>-Konzentration bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts auf ca. 560 ppm zu erwarten, was eine Verdoppelung durch Menschenhand im Vergleich zur vorindustriellen, natürlichen Konzentration bedeutet.

Während für die Luftschadstoffe SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> usw. technische Maßnahmen zur Zurückhaltung oder Umwandlung dieser Stoffe entwickelt worden sind und eingesetzt werden, gibt es keine derartigen großtechnisch praktikablen Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Verminderung.

Im Prinzip stellen die Weltmeere eine große Senke für CO<sub>2</sub> dar, da aber ihre Aufnahmekapazität mit zunehmender Temperatur sinkt, müssen zudem positive Rückkopplungseffekte bei einer Erwärmung der Erde befürchtet werden.

Dieser kleine Einblick in die Problemvielfalt, die mit einer Erwärmung der Erde und einer Veränderung des Weltklimas verbunden ist, zeigt bereits, welche Lawine damit losgetreten worden sein könnte. Hinzu kommt noch, daß die große Wärmekapazität der Ozeane dazu führt, dass sich Temperaturerhöhungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffekts erst mit 30 – 50 Jahren Verzögerung auswirken. Das bedeutet aber auch, daß Gegenmaßnahmen erst mit dieser Verzögerung wirksam werden.

#### 4.4 Mögliche Folgen des Treibhauseffektes

In den letzten Jahren ist die Klimaforschung erheblich verstärkt worden, um die Auswirkungen der von der Menschheit verursachten Veränderungen der Erdatmosphäre zu verstehen. Die Klimaforscher gehen davon aus, daß der anthropogene Treibhauseffekt zu einer Erhöhung der mittleren globalen Temperatur um

$$\Delta T = 3K \pm 1,5K$$

führen wird.

Das klingt harmlos - ist es aber nicht. Welche Brisanz in dieser Temperaturänderung der Erde steckt, erkennt man bereits daran, daß in der Vergangenheit ein Wechsel zwischen Eis- und Warmzeit eine Veränderung der mittleren globalen Temperatur von 4 bis 5 °C bedeutete. Diese Schwankungen vollzogen sich aber allmählich, in vielen Jahrtausenden - und nicht, wie prognostiziert, in einem Jahrhundert. Außerdem sagt die globale, gemittelte Temperaturänderung noch nichts über regionale Schwankungen aus, die wesentlich höher (und auch in entgegengesetzte Richtung) ausfallen können.

Folgende Auswirkungen werden erwartet:

- Zusammenbruch von Ökosystemen, die aufgrund der Veränderungsgeschwindigkeit überfordert sind. Verschiebung der Vegetationszonen: Aus fruchtbaren Gebieten werden Trockenwüsten, aus Steppen werden Feuchtgebiete.
- Zunahme der Niederschlagsmengen aufgrund der höheren Verdunstungsraten bei höheren Temperaturen, als Folge davon vermehrte Überschwemmungen.
- Zunahme von Stürmen, Wirbelstürmen, Sturmfluten und Unwettern aufgrund der höheren Energie in der Atmosphäre.
- Änderungen von Meeresströmungen (z. B. Golfstrom), so daß sich regional völlig andere (auch tiefere) Temperaturen ergeben können.
- Ansteigen der Meeresspiegel durch Volumenausdehnung des erwärmten Wassers und durch allmähliches Abschmelzen der Polkappen. Als Folge davon Überschwemmungen der Küstenregionen.
- Millionen von „Klimaflüchtlingen“, die in ihren angestammten Gebieten keine Nahrung mehr finden oder deren Land durch Überschwemmungen verloren gegangen ist.

Die dargestellten Wirkungen sind Ergebnisse aufwendiger Modellrechnungen. Während an der zu erwartenden Temperaturerhöhung kaum mehr Zweifel besteht, haben die dargestellten Auswirkungen auch spekulativen Charakter, weil die Reaktion der Atmosphäre als komplexes System mit vielen Parametern nicht ausreichend genau erfasst werden kann. Trotzdem halten viele Wissenschaftler die Klimaänderung neben einem Nuklearkrieg für die derzeit größte Bedrohung der Menschheit.

## 4.5 Gegenmaßnahmen

Da die zu erwartenden Auswirkungen des Treibhauseffektes mit einer Verzögerung von 30 – 50 Jahren eintreten und die emittierten Treibhausgase Jahrzehnte, oft Jahrhunderte in der Atmosphäre verbleiben, kann mit Gegenmaßnahmen nicht gewartet werden, bis alle Auswirkungen wissenschaftlich eindeutig geklärt sind.

Das hat auch die Politik erkannt. So rief 1987 der Deutsche Bundestag die Enquetekommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ ins Leben, die eine Vielzahl wissenschaftlicher Erkenntnisse zusammenfaßte und eine solide Datenbasis schuf und dokumentierte.

Da kein Staat der Welt allein den globalen Treibhauseffekt bekämpfen kann - das bedeutet aber nicht, daß ein Staat nicht mit gutem Beispiel vorangehen sollte - fand 1992 in Brasilien der so genannte Umweltgipfel statt, bei dem erstmals mehr als 150 Staaten die Klimakonvention unterzeichneten. Ziel dieser Konvention ist die weltweite Absenkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes.

Deutschland will seine CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2005 um 25 – 30 % gegenüber dem Jahr 1987 senken. Luxemburg will die Emissionen bis 2012 um 28% reduzieren.

Um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß wirksam zu reduzieren, muß eine Vielzahl von Maßnahmen ergriffen werden:

- Verstärkte Verwendung C-armer Brennstoffe, d. h. weniger Braunkohle, mehr Erdgas.
- Nutzung C-freier Energieträger, das sind großtechnisch bisher nur die Kernenergie und die Wasserkraft.
- Die Energieumwandlung muss mit höheren Wirkungsgraden erfolgen.
- Verstärkte dezentrale Nutzung regenerativer Energieträger, z. B. Sonnenwärme, Windkraft.
- Rationelle Energieverwendung, z. B. durch bessere Wärmeisolierung von Wohnräumen.
- Energieeinsparung.

Beim letzten Punkt kann jeder sofort beginnen. Gerade die Menschen in den Industrieländern besitzen ein riesiges Einsparpotential. Man wird sich zukünftig zweimal überlegen müssen, ob man eine auf Knopfdruck zur Verfügung stehende Energiedienstleistung benötigt, wenn man die Zusammenhänge und die Folgen des Energiekonsums bedenkt.

## 5 Saurer Regen

Der saure Regen ist eine direkte Folge der Selbstreinigungskraft der Atmosphäre vor allem für Stickstoffoxide und Schwefeldioxid.

### Aufgabe:

Wo entstehen Stickstoffoxide und Schwefeldioxid?

Mit der industriellen Tätigkeit des Menschen hat dieser Vorgang immer größere Ausmaße angenommen. Während unbelastetes Regenwasser durch das Kohlenstoffdioxid bedingt einen pH-Wert von 5,6 hat, beträgt in der Bundesrepublik Deutschland inzwischen der mittlere pH-Wert etwa 4. In Skandinavien ist im Regenwasser und Schnee bereits gelegentlich ein pH-Wert von 2,3 und im Nebel von Los Angeles sogar von 2 gemessen worden.

Der saure Regen ist nicht nur auf ein bloßes Auswaschen der Stickstoffoxide und des Schwefeldioxids zurückzuführen. In der Troposphäre, der Luftschicht bis zu einer Höhe von zehn bis zwölf Kilometer, entstehen unter dem Einflug des UV-Anteils des Sonnenlichtes aus Ozon und Wasser sehr reaktive Hydroxylradikale. Diese leiten die Bildung von salpetriger Säure und Salpetersäure aus Stickstoffdioxid und von schwefeliger Säure und Schwefelsäure aus Schwefeldioxid ein.

Die gebildeten Säuren gelangen durch Trockendeposition als trockene Stäube oder aber mit Tau, Nebel, Regen oder Schnee (Naßdeposition) als „saurer Regen“ zur Erde. Die Folgeprodukte der Stickstoffoxide tragen zu einem Drittel am sauren Regen bei, die restlichen zwei Drittel sind Folgen des Schwefeldioxids.

Es gibt zahlreiche, unübersehbare Schäden in unserer Umwelt:

- Übersäuerung von Gewässern, die teilweise zu fischleeren Seen führen.
- Übersäuerung von Böden (Abb.19), die zum Waldsterben beitragen: die in die Erde eindringende Säure löst Aluminiumverbindungen in der Erde, die nicht wasserlöslich sind. Die neu entstandenen, wasserlöslichen Aluminiumverbindungen schädigen die Wurzeln der Bäume und stören die Wasser- und Nährsalzaufnahme.
- Waldsterben bedingt durch die direkte Einwirkung des sauren Regens auf die Nadeln und Blätter der Bäume.
- Verwitterung von Gebäuden, Kunstdenkmälern (Abb.20), Hausfassaden und Betonbrücken. Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ) reagiert mit Schwefelsäure zu wasserlöslichem Calciumsulfat ( $\text{CaSO}_4$ ). Dieser wird dann durch Regen ausgewaschen.

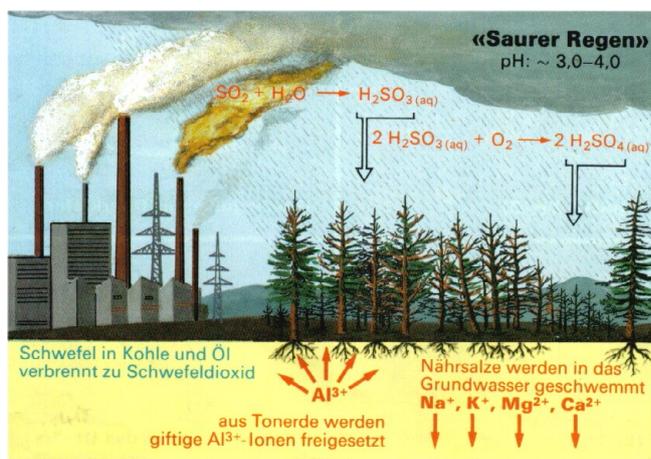


Abb.19: Saurer Regen und Waldsterben



Abb.20: Schäden an Kunstwerken

Ein erhebliches Gewicht wird diesen Schadstoffen aus der Luft auch im Zusammenhang mit der Eutrophierung der Nordsee beigemessen.

### Aufgabe:

Welche Maßnahmen können getroffen werden, damit weniger saurer Regen entsteht?



## D Quantenphysik

### 1 Fotoeffekt

An einem Elektroskop (Abb.1), das mit einer Zinkplatte leitend verbunden ist, werden mehrere Messungen durchgeführt. Hierbei wird die Zinkplatte nacheinander negativ bzw. positiv aufgeladen, was am Ausschlagen des Zeigers zu erkennen ist.

Die Platte wird dann mit Licht unterschiedlicher Herkunft (verschiedene Lampen) beleuchtet und die Reaktionen am Zeiger werden beobachtet.



Abb.1: Elektroskop

#### Zusammenfassung der Beobachtungen:

Das Elektroskop verliert seine Ladung nur, wenn es negativ aufgeladen ist und mit dem Licht einer Quecksilberlampe bestrahlt wird.

#### Interpretation der Beobachtungen:

Die negative Aufladung der Zinkplatte entspricht einem Überschuss an Elektronen auf der Metalloberfläche. Durch Bestrahlen mit **ultraviolettem Licht** erhalten diese Elektronen die notwendige Energie, um von der Platte **abgelöst** oder **emittiert** zu werden.

Eine höhere Lichtintensität (Bestrahlungsstärke) durch Bündeln des Lichtes führt nicht zu dem Effekt, da die ultravioletten Strahlen des Lichtes von gewöhnlichem Glas nicht durchgelassen werden. Es ist daher die **Wellenlänge des Lichtes**, die für das Auftreten des Fotoeffektes verantwortlich ist.

Bei einer positiven Aufladung der Zinkplatte ist kein Effekt zu beobachten, da hier ein Elektronenmangel vorliegt. Die positiv geladenen Metallrumpfe sind unbeweglich in ihrer Gitterstruktur angeordnet, sie können nicht abgelöst werden.

Die **Emission von Elektronen** aus einem Festkörper durch die Bestrahlung mit **Licht** bezeichnet man als **Fotoeffekt** oder **äußeren lichtelektrischen Effekt**.

Die freigesetzten Elektronen bezeichnet man als **Fotoelektronen**.

#### Erklärungen des Fotoeffektes:

Die Elektronen in einem Metall besitzen durch die Umgebungswärme Energie, die zu ungeordneten Bewegungen führen. Die Anziehungskräfte der positiv geladenen Atomrümpfe sind so stark, dass die Elektronen die Metalloberfläche nicht verlassen können.

Durch Zufuhr von Energie in Form von **Lichtquanten** können die Elektronen abgelöst werden. Hierzu muss die Energie des Lichtes mindestens der **Austrittsarbeit** entsprechen.

Die Energie der Lichtstrahlen hängt von der Wellenlänge / Frequenz des Lichtes ab (siehe Kapitel Chemie/Der Atombau Seite V.B2). Wenn die Lichtstrahlen nicht genügend kurzwellig d.h. energiereich sind, kann die Austrittsarbeit nicht verrichtet werden.

Die Differenz zwischen zugeführter Lichtenergie und erforderlicher Austrittsarbeit entspricht der kinetischen Energie der emittierten Fotoelektronen.

### 2 Fotozelle

Beim Fotoeffekt hängt die **Austrittsarbeit** der Elektronen vom Metall, dessen Reinheitsgrad und dessen Oberflächenbeschaffenheit ab.

Bei manchen Materialien (z.B. Kalium oder Cäsium) reicht die Wellenlänge von sichtbarem Licht aus, um die Elektronen des Metalls abzulösen.

Eine Anwendung des äußeren Fotoeffektes sind Vakuum-Fotozellen, in denen sogenannte **Fotokatoden** aus Kalium oder Cäsium mit einer Anode in einem luftleeren Glaskolben eingeschlossen sind. Beim Einstrahlen von sichtbarem Licht fließt ein Strom, dessen Stärke von der Bestrahlungsstärke abhängt.

### 3 Aufgaben

Beantworte nachfolgende Fragen zum Fotoeffekt:

1. Wodurch unterscheidet sich das Licht einer Quecksilberlampe von normalem Licht?
2. Die negativ geladene Zinkplatte eines Elektroskops wird mit einer 100W-Lampe beleuchtet. Was passiert?
3. Die negativ geladene Zinkplatte eines Elektroskops wird mit fünf 500W-Lampen beleuchtet.
  - a) Was passiert?
  - b) Wodurch unterscheidet sich die Strahlung zu der von Punkt 2?
4. Eine Quecksilberlampe wird näher an die negativ geladene Zinkplatte eines Elektroskops geschoben.
  - a) Was passiert?
  - b) Was verändert sich an der Strahlung?
  - c) Erkläre den Unterschied zu Punkt 3.
5. Die negativ geladene Zinkplatte eines Elektroskops wird durch eine Cäsiumplatte ersetzt. (Austrittsarbeit:  $W_A = 1,96 \text{ eV}$ )
  - a) Was passiert bei normalem Licht?
  - b) Wodurch unterscheiden sich die beiden Platten?
6. Kann ein Elektron die Energie von mehreren Photonen einfangen, um sich von der Platte zu lösen?
7. Was macht das Elektron mit der eingefangenen Energie?
8. Erkläre die Analogie zwischen dem Fotoeffekt und Abb.2.

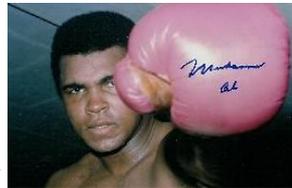


Abb.2: Ali

## E Halbleitertechnik

In unserem Alltag haben wir permanent mit elektronischen Bauteilen zu tun, vom Wecker morgens über den Taschenrechner, die Haushaltsgeräte, den Computer u.v.a. mehr bis (eventuel abends) zum Fernsehgerät.

Die **Elektronik** ist die Technik von elektrischen Schaltungen, bei der elektronische Bauteile verwendet werden. Dies sind (meist kleine bis sehr kleine) Bauteile, die oft aus Halbleiterwerkstoffen hergestellt sind. Dem gegenüber werden in der **Elektrotechnik** hauptsächlich Metalle (oder Metallegierungen) und Nichtmetalle (als Isolatoren) verwendet.

Bekannte Bauteile aus der Elektronik sind beispielsweise Dioden (Photo- oder Leucht-), Transistoren und integrierte Schaltkreise (IC, „integrated circuits“).

### 1 Leitfähigkeit von Stoffen

#### 1.1 Leitfähigkeit und Atomaufbau

Die Atome sind -im einfachen Modell- aus Atomkernen und Elektronen aufgebaut, wobei letztere auf Schalen verteilt sind. Die **Elektronen der äußeren Schale** sind für das chemische und physikalische Verhalten des Elementes verantwortlich. Die restlichen Elektronen gemeinsam mit dem Atomkern bezeichnet man als **Atomrumpf**. Dessen positive Ladung entspricht der Anzahl an Elektronen der äußeren Schale.

Die elektrische Leitfähigkeit von Werkstoffen hängt von der Beweglichkeit der Elektronen der äußeren Schale ab. Man unterscheidet bei den Elementen zwischen Leitern, Nichtleitern und Halbleitern.

##### 1.1.1 Leiter

Metalle sind elektrische Leiter. Die äußeren Elektronen aller Atome halten alle Atomrümpfe zusammen. In einem elektrischen Feld lassen diese Elektronen sich leicht verschieben, daher die gute elektrische Leitfähigkeit der Metalle.

Dieses Verhalten läßt sich durch das Modell von SHOCKLEY veranschaulichen: Die Elektronen werden durch Autos dargestellt, die auf verschiedenen Etagen geparkt sind. Freier Platz, der ein Verschieben der Autos gestattet, entspricht einer Beweglichkeit der Elektronen.

Bei einem Leiter ist im Garagenmodell das Obergeschoß nur teilweise besetzt (Abb.1). Die Bewegungsmöglichkeiten der Autos stellen die Beweglichkeit der Elektronen dar.

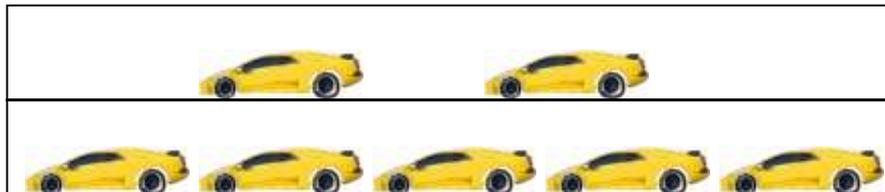


Abb.1: Bewegungsmöglichkeit beim Leiter

##### 1.1.2 Nichtleiter

Hier sind keine freien Elektronen vorhanden, so daß bei einer Spannungsdifferenz kein Strom fließt.

Im Garagenmodell sind das Obergeschoß leer und das Untergeschoß vollständig besetzt (Abb.2), so dass es keine Bewegungsmöglichkeiten für die Autos gibt.

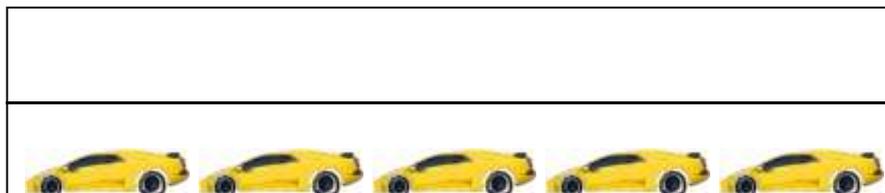


Abb.2: Keine Bewegungsmöglichkeit beim Nichtleiter

### 1.1.3 Halbleiter

Als Halbleiter bezeichnet man Stoffe, deren elektrische Leitfähigkeit sich von der eines Nichtleiters und eines Leiters unterscheidet. Die Elemente **Silizium** und **Germanium** sind ebenso Halbleiter wie die Verbindung **Galliumarsenid** (GaAs).

Silizium und Germanium sind Elemente der IV. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente. Demzufolge haben sie 4 äußere Elektronen (Valenzelektronen). Im festen Zustand bilden sie ein Kristallgitter, in dem jeder Atomrumpf über 4 **Elektronenpaarbindungen** mit vier weiteren Atomrümpfen (Abb.3) verbunden ist.

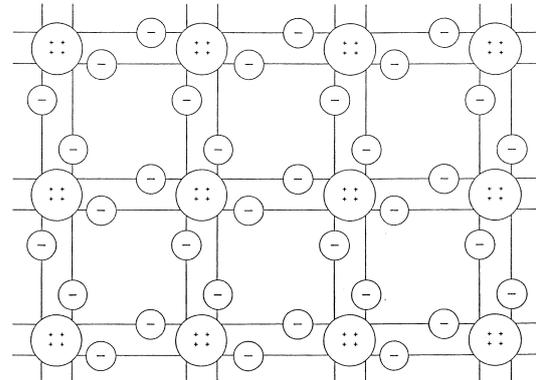


Abb.3: Kristallgitter mit Elektronenpaarbindungen

Somit sind keine freien Elektronen vorhanden. Der Halbleiter verhält sich wie ein Isolator. Dies gilt bei Temperaturen von  $T = 0 \text{ K}$ . Das Garagenmodell entspricht dem des Nichtleiters (Abb.2).

Bei Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt bilden sich freie Elektronen.

Im Garagenmodell (Abb.4) werden (bei  $T > 0 \text{ K}$ ) Autos eine Etage höher gehoben. Dementsprechend entsteht sowohl eine Bewegungsmöglichkeit im Untergeschoß als auch im Obergeschoß.

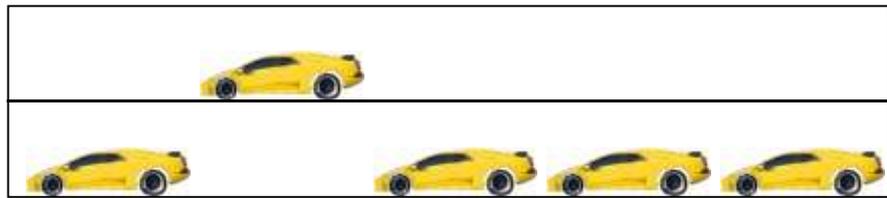


Abb.4: Bewegungsmöglichkeiten beim Halbleiter ( $T > 0 \text{ K}$ )

## 1.2 Leitungsvorgänge im Halbleiter

Die Zufuhr thermischer Energie führt zu einer Leitfähigkeit der Halbleiter, die man als **Eigenleitung** bezeichnet. Daneben erzielt man die sogenannte **Störstellenleitung** durch Verunreinigen der Halbleiterelemente mit Fremdatomen.

### 1.2.1 Eigenleitung

Bei Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt schwingen alle Bauteile der Materie. Dabei lösen sich einige Elektronen von den Atomrümpfen (Abb.5). Man spricht von **freien Elektronen**, da sie sich frei bewegen können.

In den entsprechenden Elektronenpaarbindungen fehlen somit Elektronen, es entstehen **Elektronenlücken**, die auch als **Defektelektronen** oder **Löcher** bezeichnet werden. Man kann diese Defektelektronen auch als **positiv geladene Teilchen** betrachten, da sie fehlende negative Ladungen in einer Bindung sind.

Mit steigender Temperatur wächst auch die Anzahl der sich bildenden freien Elektronen und Defektelektronen. Man spricht von **Paarerzeugung**, da beide immer paarweise erzeugt werden.

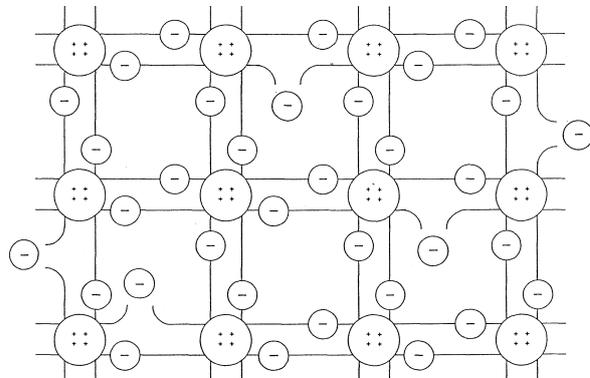


Abb.5: Paarerzeugung

Trifft ein sich frei bewegendes Elektron auf ein Loch und "fällt" es hinein, wird wieder eine Elektronenpaarbindung hergestellt. Den Vorgang bezeichnet man als **Rekombination**. Zwischen Rekombination und Paarerzeugung herrscht ein **thermisches Gleichgewicht**.

Legt man eine elektrische Spannung an einen Halbleiter an, wandern die freien Elektronen zum positiven Pol (Abb.6). Man spricht von der **Elektronenleitung**.

Dementsprechend bewegen sich die Defektelektronen oder Löcher zum negativen Pol. Diesen Vorgang bezeichnet man als **Löcherleitung**.

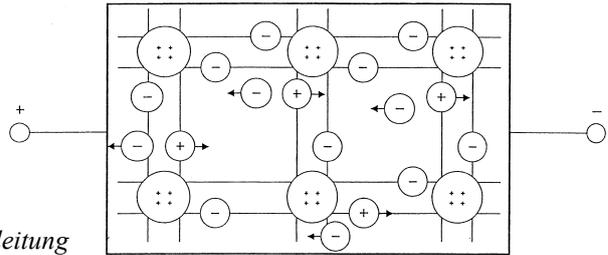


Abb.6: Elektronen- und Lochleitung

Der elektrische Strom im Halbleiter besteht somit aus den beiden Anteilen Elektronenstrom und Löcherstrom.

### 1.2.2 Störstellenleitung

Die Halbleiterelemente sind vierwertig. Ersetzt man einige (ca. jedes 100 Millionste) der Halbleiteratome im Gitter durch drei- oder fünfwertige Atome, führt dies zu elektrischer Leitfähigkeit. Diese ist bei Raumtemperatur um mehrere Zehnerpotenzen größer als die Eigenleitung der Halbleiter.

Bei hohen Temperaturen wird die Eigenleitung größer als die Störstellenleitung.

Beim sogenannten **Dotieren** mit Fremd- oder **Störatomen** muß man grundsätzlich zwei Fälle unterscheiden.

#### n-Leitung

Werden Halbleiterelemente (z.B.Silizium) mit fünfwertigen Elementen (z.B. **Phosphor, Arsen, Antimon**) dotiert, bleibt nach den Elektronenpaarbindungen ein Valenzelektron des Störatoms übrig. Es ist nur schwach an den Atomrumpf gebunden und wird mit geringem Energieaufwand abgetrennt. Dann wird es zu einem **freien Elektron** (Abb.7) und nimmt am Ladungstransport teil.

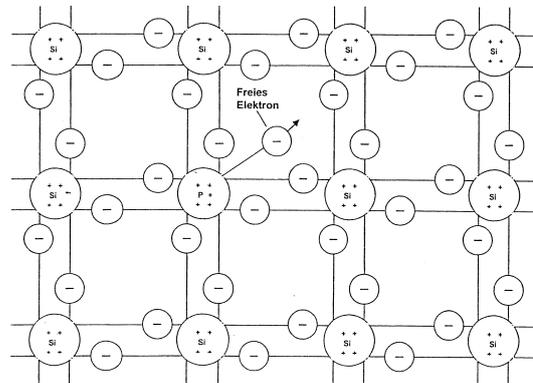


Abb.7: Erzeugung freier Elektronen bei n-Leitung

Die elektrische Leitfähigkeit bei der n-Leitung beruht demnach hauptsächlich auf Elektronenleitung. Im Garagenmodell (Abb.8) wird jedes freie Elektron durch ein Auto im Obergeschoß dargestellt.

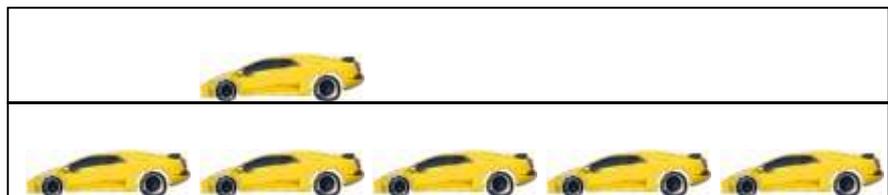


Abb.8: Bewegungsmöglichkeit bei n-Leitung

#### p-Leitung

Das Dotieren von Halbleiterelementen mit dreiwertigen Atomen (z.B. **Aluminium, Gallium, Indium** oder **Bor**) führt dazu, daß bei jedem Störatom an einer (der vier) Elektronenpaarbindungen im Gitter ein Elektron fehlt. Diese offene Bindung stellt ein **Loch** dar (Abb.9).

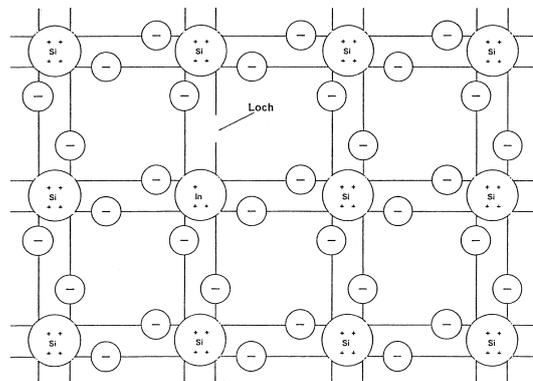


Abb.9: Erzeugung von Löchern bei p-Leitung

Die Löcher verhalten sich wie positive Ladungsträger. Da ein Elektron eines benachbarten Atoms dieses Loch besetzen kann, bewegt das Loch sich „sprunghaft“ weiter.

Die elektrische Leitfähigkeit bei der p-Leitung entsteht durch diese Löcherbewegung. Sie ist der Elektronenbewegung entgegengesetzt.

Im Garagenmodell (Abb.10) wird jedes Loch durch ein fehlendes Auto im Untergeschoß dargestellt. Hier ist somit eine Bewegung möglich.

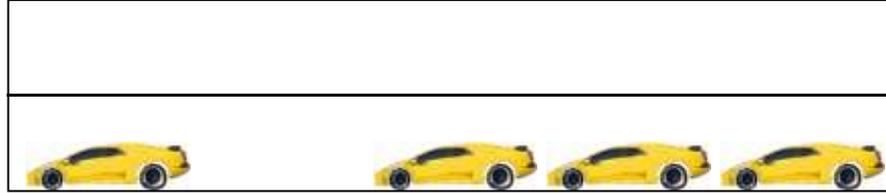


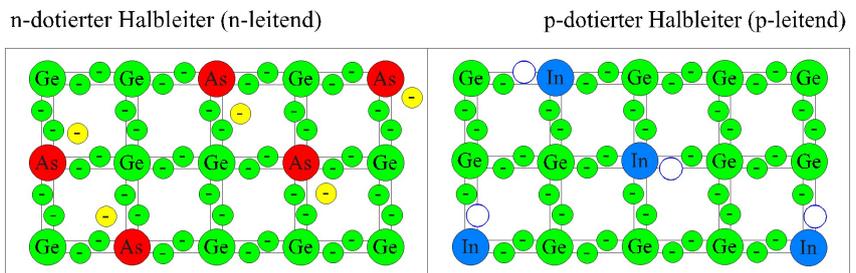
Abb.10: Bewegungsmöglichkeiten bei p-Leitung

### 1.3 pn-Übergang

Fügt man einen p-dotierten und einem n-dotierten Halbleiter zusammen, entsteht ein sogenannter pn-Übergang.

In Abb.11 ist ein mit Arsen bzw. Indium dotiertes Germanium-Kristall dargestellt.

Abb.11: pn-Übergang

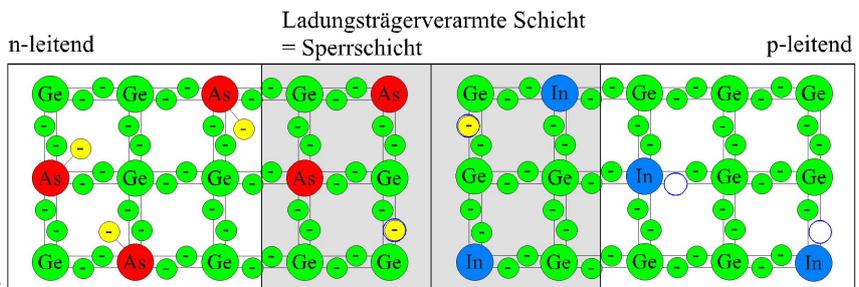


#### 1.3.1 pn-Übergang ohne äußere Spannung

Durch die natürliche Wärmebewegung diffundieren („wandern“) Löcher aus dem p-dotierten Bereich durch die Grenzschicht in den n-dotierten Bereich. Ebenso diffundieren freie Elektronen aus dem n-dotierten Bereich in den p-dotierten Bereich. Es kommt zu **Rekombinationen**: die Elektronen „fallen“ in die Löcher.

Durch die Rekombinationen entsteht eine **ladungsträgerverarmte Schicht**, die man als **Grenzschicht** bezeichnet (Abb.12). Da sie keine Leitfähigkeit hat, nennt man sie auch **Sperrschicht**.

Abb.12: Bildung einer Sperrschicht



Der Sperrschicht fehlen im Bereich der p-Dotierung -positiv geladene- Löcher, somit entsteht eine negative Ladung. Ebenso fehlen im Bereich der n-Dotierung -negativ geladene- Elektronen, und es entsteht eine positive Ladung (Abb.13). Die Spannung zwischen den **Raumladungen** bezeichnet man als **Diffusionsspannung**

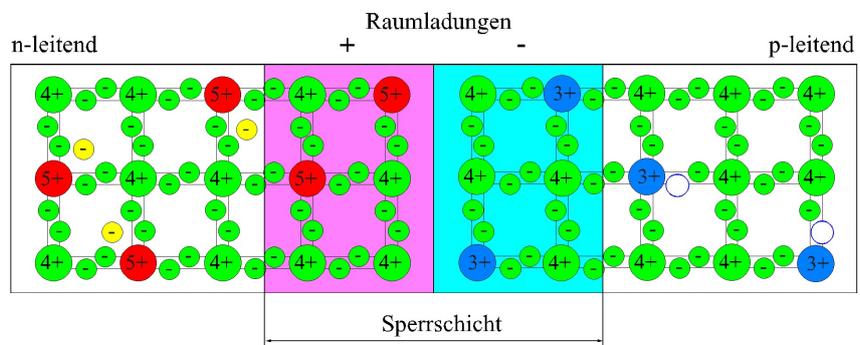


Abb.13: Raumladungen der Sperrschicht

Beide Ladungen erschweren mit zunehmender Größe das weitere Eindringen von Löchern beziehungsweise Elektronen. Die Sperrschicht wächst nur bis zu einem Gleichgewichtszustand, der durch die Diffusionsspannung gekennzeichnet wird.

### 1.3.2 pn-Übergang mit äußerer Spannung

#### Minus an p-Schicht und Plus an n-Schicht:

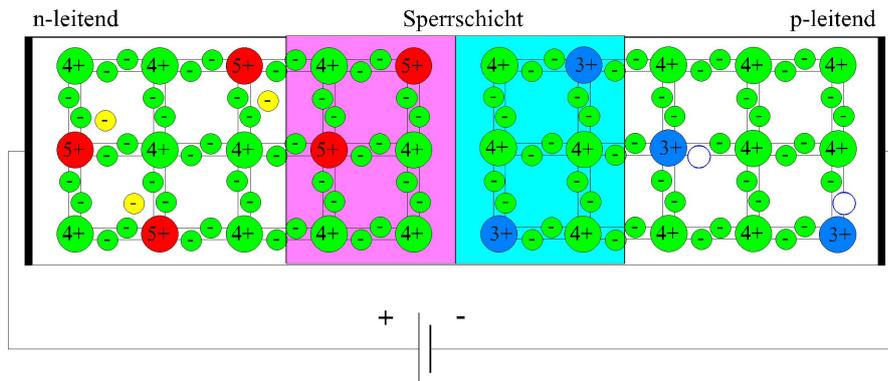


Abb.14: pn-Übergang mit äußerer Spannung

Die beweglichen Elektronen des n-Leiters werden vom positiven Pol und die beweglichen Löcher des p-Leiters vom negativen Pol angezogen (Abb.14): **die Grenzschicht verbreitert sich.**

Es bleiben dadurch noch weniger bewegliche Ladungsträger im pn-Übergang, so daß dieser kaum noch elektrischen Strom leitet. Er wird quasi zu einem Isolator, der elektrischer Widerstand steigt um einige Zehnerpotenzen. Den sehr schwachen Strom, der durch die Sperrschicht fließen kann, bezeichnet man als **Sperrstrom**.

#### Plus an p-Schicht und Minus an n-Schicht:

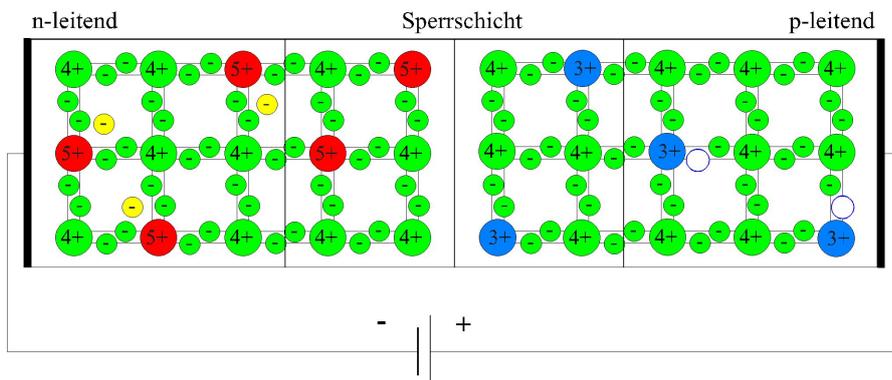


Abb.15: pn-Übergang mit äußerer Spannung

Die beweglichen Elektronen des n-Leiters und die beweglichen Löcher des p-Leiters bewegen sich auf die Sperrschicht zu (Abb.15). Die Elektronen und die Löcher **rekombinieren** am pn-Übergang. Die Sperrschicht wird enger.

Wenn die äußere Spannung größer wird als die Diffusionsspannung, wird die Sperrschicht praktisch ganz abgebaut. In den n-Leiter treten laufend neue Elektronen ein, an dem p-Leiter treten sie aus und hinterlassen somit Löcher. Im äußeren Leiterkreis **fließt Strom**.

## 2 Dioden

Dioden sind mit die wichtigsten Bauelemente der Elektronik. Sie bestehen aus einem Gehäuse aus Keramik, Metall oder Glas, das zwei Anschlüsse (Anode und Katode) hat. Der innere Aufbau besteht aus einem pn-Übergang.

### 2.1 Gleichrichterioden

Gleichrichterioden werden verwendet um Wechselspannungen in Gleichspannungen umzuwandeln. Hier wird die Ventilwirkung des pn-Übergangs ausgenutzt: Strom kann nur in einer Richtung durch den pn-Übergang fließen.

Die Diode besteht aus zwei fest verbundenen Halbleiterkristallschichten.

Das Schaltsymbol (Abb.16) kennzeichnet den Aufbau, die Pfeilrichtung deutet die stromdurchlässige Richtung von Plus nach Minus an. Dementsprechend stellt das Dreieck die **p-leitende Schicht (Anode)** und der Strich die **n-leitende Schicht (Katode)** dar.

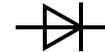


Abb.16: Diode

#### 2.1.1 Wirkungsweise

Wenn der positive Pol einer Spannungsquelle an der Dioden-Anode und der negative Pol an der -Katode liegen (**Durchlaßrichtung**), sinkt der elektrische Widerstand der Diode. Sie wird **niederohmig** (entsprechend einem pn-Übergang mit Plus an p-Schicht und Minus an n-Schicht).

Wenn die Spannung groß genug ist, wird die Diode stromdurchlässig. Die Stromstärke hängt von der anliegenden Spannung ab.

Liegt die Spannung umgekehrt an der Diode (**Sperrichtung**), wird die Diode **hochohmig**. Es fließt quasi kein Strom.

Dioden sind somit Bauteile mit **stromrichtungs-abhängigem Widerstand**.

#### 2.1.2 Diodenkennlinien

Informationen über die Eigenschaften von Dioden sind ihren **Strom-Spannungs-Kennlinien** (Abb.17) zu entnehmen.

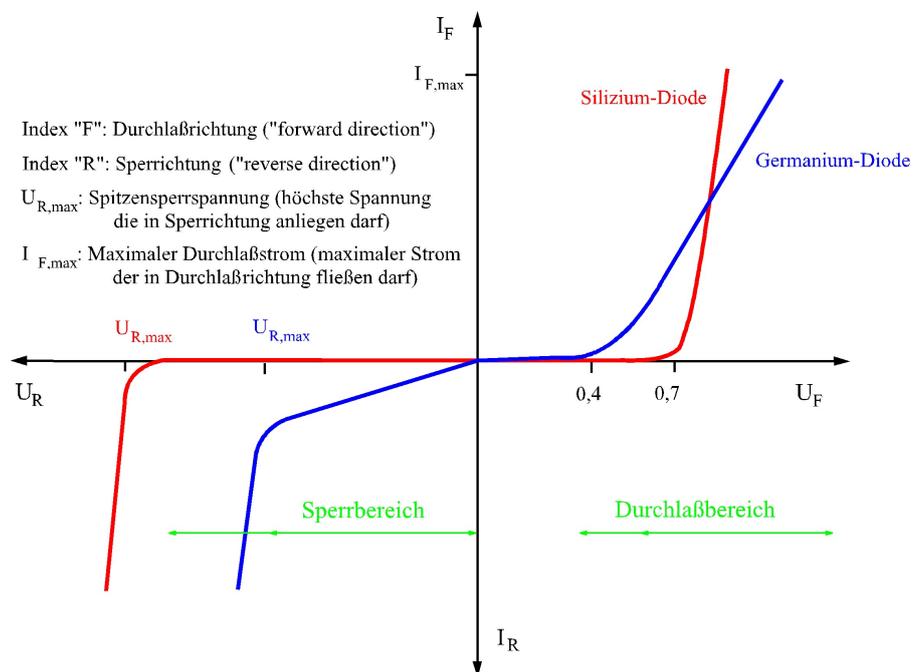


Abb.17: Diodenkennlinien

In Durchlaßrichtung erkennt man daß Strom erst ab einer bestimmten Spannung fließt. Diese wird als Schwell-, Schleusen-, Diffusions- oder **Durchlaßspannung**  $U_s$  bezeichnet.

Nach Überschreiten der Durchlaßspannung tritt sehr schnell ein starker Stromfluß ein. Der **maximale Durchlaßstrom**  $I_{F,max}$  darf nicht überschritten werden, sonst wird die Diode zerstört.

In Sperrichtung fließt quasi kein Strom. Beim Überschreiten der **Spitzensperrspannung**  $U_{R,max}$  wird die Diode ebenfalls zerstört.

### 2.1.3 Idealisierte Kennlinie und Ersatzschaltung

Die nichtlineare Kennlinie der Diode (Abb.18) wird zur Vereinfachung als lineare Kennlinie (Abb.19) idealisiert.

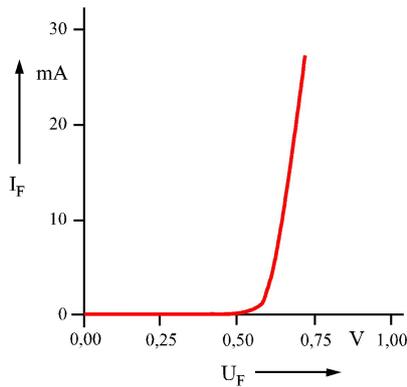


Abb.18: Dioden-Kennlinie

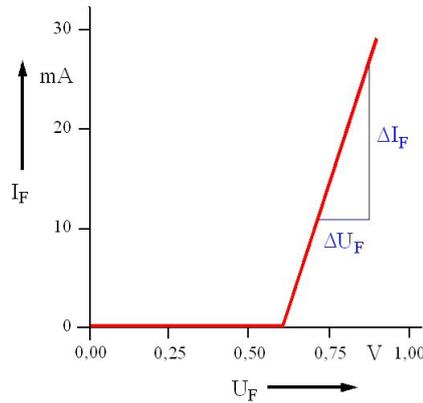


Abb.19: Idealisierte Kennlinie

Dieser idealisierten Kennlinie entspricht der abgebildeten Ersatzschaltung (Abb. 20).

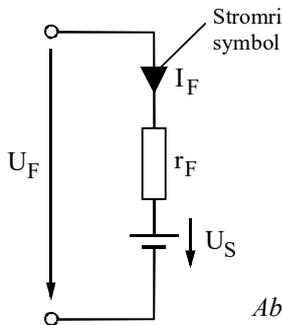


Abb.20: Ersatzschaltung

Die Ersatzschaltung besteht aus der Spannungsquelle  $U_S$ , dem differentiellen Widerstand  $r_F$  und dem Stromrichtungssymbol.

Die Spannungsquelle  $U_S$  besagt daß erst nach Überwinden dieser Spannung Strom fließt. Die Spannungsquelle kann von sich aus keinen Strom in einen äußeren Stromkreis einspeisen.

Das Stromrichtungssymbol gibt an daß die Ersatzquelle stromrichtungsabhängig ist. Als Voraussetzung für einen Stromfluß gilt daß die äußere Spannung  $U_F$  größer ist als die Spannungsquelle  $U_S$ .

Der Ersatzwiderstand  $r_F$  lässt sich aus der idealisierten Kennlinie herleiten:

$$r_F = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F}$$

## 2.2 Fotodioden

Die Leitfähigkeit des p-n-Übergangs wird durch einfallendes Licht verändert. Bei der Informationsübertragung mit Licht werden daher als Empfänger so genannte **Fotodioden** (Abb.21) verwendet.

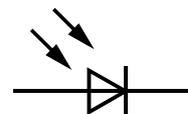


Abb.21: Fotodiode

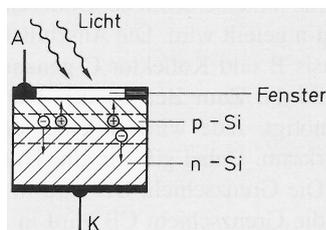


Abb.22: Aufbau Fotodiode

Bei Fotodioden (Abb.22) wird eine großflächige Grenzschicht durch ein Fenster mit Licht bestrahlt.

Durch die Absorption des Lichtes werden Ladungsträgerpaare (d.h. freie Elektronen und Löcher) gebildet. Somit erhöht sich die Leitfähigkeit des p-n-Übergangs.

Fotodioden werden in Sperrichtung betrieben. Der Sperrstrom d.h. der durch die Diode fließende Strom ist der Beleuchtungsstärke proportional.

## 2.3 Solarzellen

Fotodioden die als Spannungsquellen verwendet werden bezeichnet man als **Fotoelemente**, Hauptanwendung ist dabei die **Solarzelle**.

Solarzellen werden in **Durchflussrichtung** betrieben. In einer wiederum großflächigen Grenzschicht werden durch einstrahlendes (Sonnen)licht Ladungsträgerpaare generiert. Aufgrund des Diffusionsfeldes wandern die Elektronen in den n-dotierten Bereich und die Löcher in den p-dotierten Bereich. Zwischen den beiden Enden der Diode entsteht eine Spannung, die bis zu 0,5 V betragen kann.

## 2.4 Lumineszenzdioden

**Lumineszenz-** oder **Leuchtdioden (LED)** (Abb.23 und 25) sind ähnlich aufgebaut wie Fotodioden.

An eine dicht unter der Oberfläche liegenden, großflächigen Grenzschicht (Abb.24) wird eine Spannung angelegt.

Die Lumineszenzdiode wird in **Durchflussrichtung** betrieben. Die Elektronen und die Löcher rekombinieren in der Grenzschicht, die freigewordene Energie wird als Licht abgestrahlt.

Die LED's leuchten in unterschiedlichen Farben, je nachdem, welches Halbleitermaterial (unterschiedliche Mischkristalle) verwendet wurde.

Die Kennlinien von LED's sind ähnlich wie die von Gleichrichterdiode, die Schleusenspannungen sind jedoch höher.

Anwendungsbeispiele: farbige Signalelemente, infrarote Lichtsender in Fernbedienungen, Laserdioden.

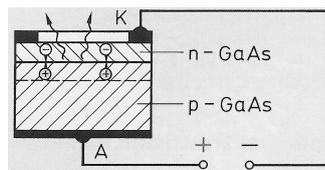


Abb.24: Aufbau Lumineszenzdiode

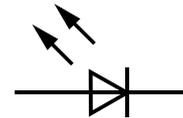


Abb.23: Lumineszenzdiode

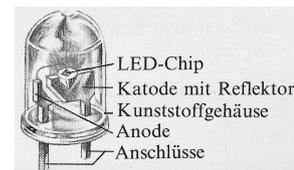


Abb.25: Lumineszenzdiode

## 2.5 Aufgaben zu Dioden

### Aufgabe 1:

Das Datenblatt einer Diode ergibt die dargestellte Kennlinie (Abb.22).

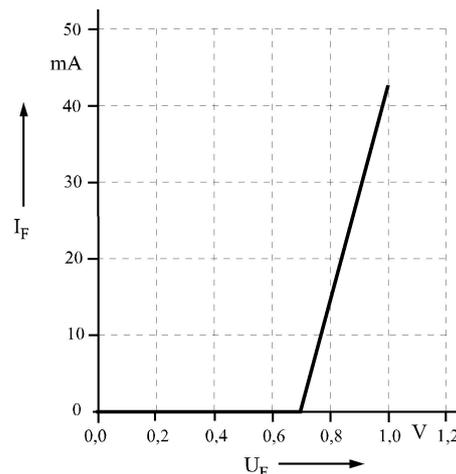
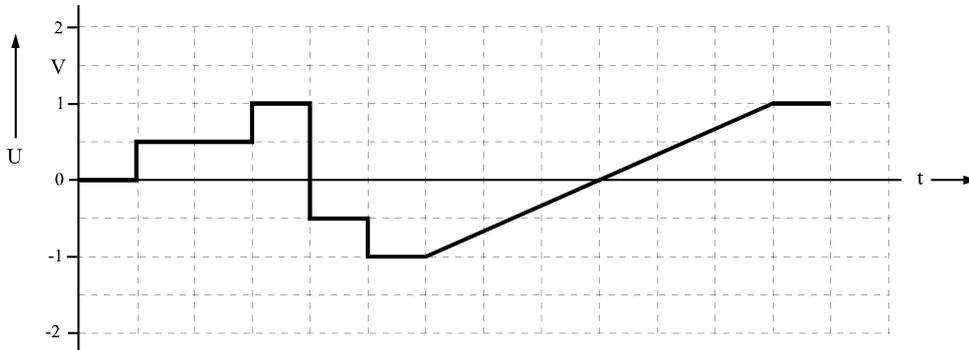
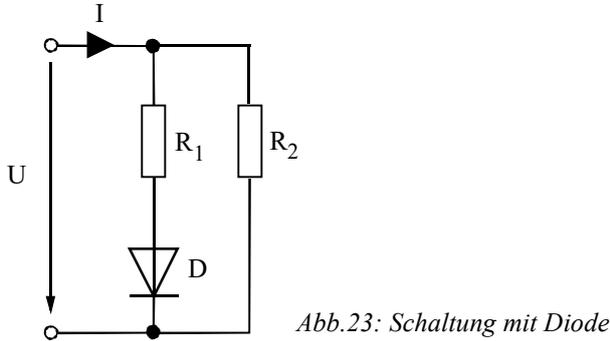


Abb.22: Dioden-Kennlinie

- Wie groß sind der differentielle Widerstand und die Schleusenspannung?
- Berechne die maximale Spannung  $U_F$  die angelegt werden darf, damit der Strom unter 30 mA bleibt.
- Ermittle diese maximale Spannung  $U_F$  aus der Kennlinie.
- Es wird eine reale Spannungsquelle ( $U_0 = 10 \text{ V}$ ,  $R_i = 2 \Omega$ ) angeschlossen. Wie groß muß der Vorwiderstand  $R_V$  sein, damit der Strom auf 20 mA begrenzt wird?

**Aufgabe 2:**

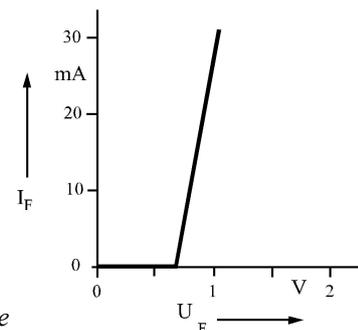
Für nachfolgende Schaltung (Abb.23) gilt:  $R_1 = R_2 = 200 \Omega$ ,  $r_F = 50 \Omega$  und  $U_S = 0,6 \text{ V}$ . Die anliegende Spannung ändert zeitlich. Der Verlauf  $U = U(t)$  ist in einem Diagramm dargestellt (Abb.24). Berechne die benötigten Zahlenwerte für den Verlauf  $I = I(t)$  und zeichne den Verlauf in ein Diagramm.



**Aufgabe 3:**

Eine Diode wird mit einem Vorwiderstand von  $33 \Omega$  in Reihe geschaltet. Die Spannungsquelle hat eine Leerlaufspannung von  $1,6 \text{ V}$  und eine Kurzschlussstromstärke von  $55 \text{ mA}$ . Die Kennlinie der Diode ist in Abb.26 dargestellt.

- a) Zeichne die Ersatzschaltung.
- b) Welche Stromstärke fließt durch die Schaltung?



## 2.6 Arbeitspunktbestimmung bei Schaltungen

### 2.6.1 Reihenschaltung von zwei Widerständen

Bei der Reihenschaltung von Widerständen können die Spannungsabfälle an den Widerständen rechnerisch oder zeichnerisch bestimmt werden.

#### Rechnerische Methode

##### Aufgabe:

In Abb. 27 ist eine Reihenschaltung von zwei Widerständen dargestellt.

Gegeben:  $R_1 = 20 \Omega$ ,  $R_2 = 80 \Omega$ ,  $U = 100 \text{ V}$

Gesucht:  $U_1$ ,  $U_2$

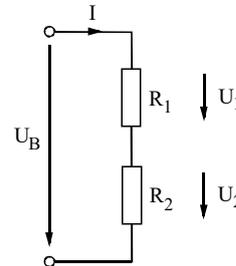


Abb.27: Reihenschaltung von Widerständen

##### Lösung:

$$I = \frac{U}{R_{\text{ges}}}$$

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2$$

$$R_{\text{ges}} = 20 \Omega + 80 \Omega$$

$$R_{\text{ges}} = 100 \Omega$$

$$I = \frac{100 \text{ V}}{100 \Omega} \quad R_{\text{ges}} = R_1 + R_2$$

$$I = 1 \text{ A}$$

$$U_1 = R_1 \cdot I$$

$$U_1 = 20 \Omega \cdot 1 \text{ A}$$

$$\underline{U_1 = 20 \text{ V}}$$

$$U_2 = R_2 \cdot I$$

$$U_2 = 80 \Omega \cdot 1 \text{ A}$$

$$\underline{U_2 = 80 \text{ V}}$$

#### Zeichnerische Methode

##### Aufgabe:

Gegeben:  $R_1 = 20 \Omega$ ,  $R_2 = 80 \Omega$ ,  $U = 100 \text{ V}$

Gesucht:  $U_1$ ,  $U_2$

##### Lösung:

Die Schaltung wird zunächst etwas anders dargestellt (Abb.28).

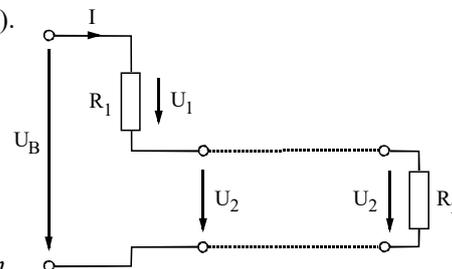


Abb.28: Reihenschaltung von Widerständen

Entsprechend der Schaltung kann die Spannung  $U_2$  mit den beiden nachfolgenden Formeln berechnet werden:

$$U_2 = U - R_1 \cdot I \quad \text{Gl. (1)}$$

$$U_2 = R_2 \cdot I \quad \text{Gl. (2)}$$

Die Widerstandsgeraden für  $R_1$  und  $R_2$  sollen graphisch dargestellt werden. Hierzu werden jeweils zwei Punkte gebraucht.

Gleichung (2) umgestellt:  $I = \frac{U_2}{R_2}$

Daraus berechnen sich für  $R_2$

Punkt 1:  $U_2 = 0 \text{ V}$   $I =$

Punkt 2:  $U_2 = 100 \text{ V}$   $I =$

Die Widerstandsgerade für  $R_2$  wird in einem I-U-Diagramm (Abb.29) graphisch dargestellt.

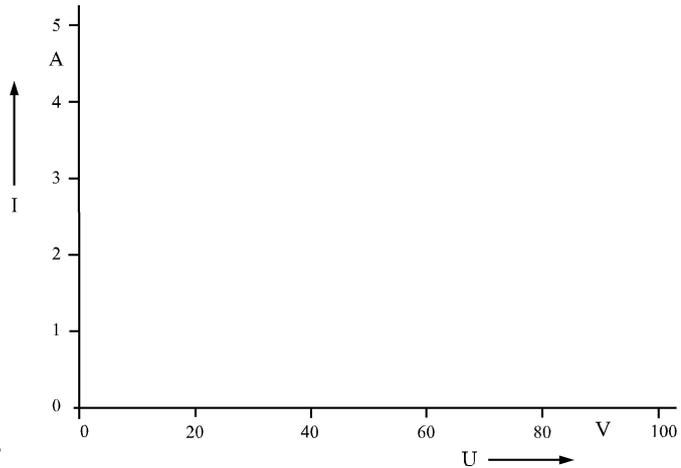


Abb.29: Widerstandsgerade von  $R_2$

Gleichung (1) umgestellt:  $U_2 = U - R_1 \cdot I$

$U - U_2 = R_1 \cdot I$

$I = \frac{U - U_2}{R_1}$

Mit  $U = 100 \text{ V}$  berechnen sich

Punkt 1:  $U_2 = 0 \text{ V}$   $I =$

Punkt 2:  $U_2 = 100 \text{ V}$   $I =$

Die Widerstandsgerade für  $R_1$  wird in einem I-U-Diagramm (Abb.30) graphisch dargestellt.

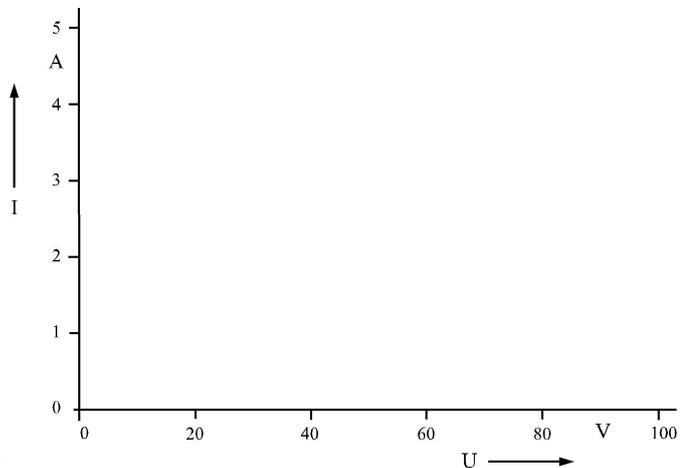


Abb.30: Widerstandsgerade von  $R_1$

Um den **Arbeitspunkt A** der Schaltung zu ermitteln, werden beide Widerstandsgeraden in ein gemeinsames I-U-Diagramm (Abb.31) eingetragen.

Der Schnittpunkt A der beiden Geraden entspricht dem Arbeitspunkt der Schaltung. Auf den beiden Achsen liest man die Spannungsabfälle und den Strom ab:

$U_1 = 20 \text{ V}$

$U_2 = 80 \text{ V}$

$I = 1 \text{ A}$

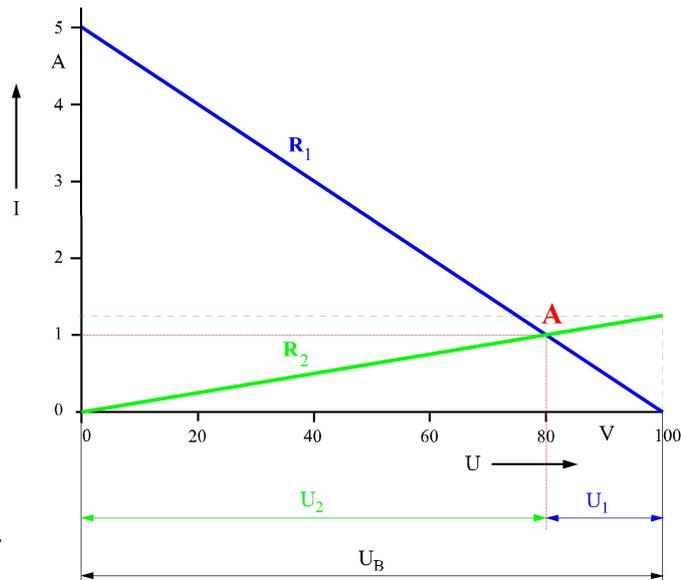


Abb.31: Arbeitspunktbestimmung bei der Reihenschaltung von Widerständen



## 2.6.2 Reihenschaltung von Diode und Widerstand

Die Bestimmung des Arbeitspunktes bei der Reihenschaltung einer Diode und eines Widerstandes (Abb.32) kann nicht mit der rechnerischen Methode erfolgen, da die Kennlinie einer Diode keinen linearen Verlauf hat.

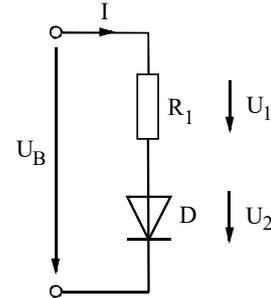


Abb.32: Reihenschaltung von Diode und Widerstand

Man erhält den Arbeitspunkt der Schaltung mit der zeichnerischen Methode (Abb.33). Es ist der Schnittpunkt der Diodenkennlinie und der Widerstandsgeraden.

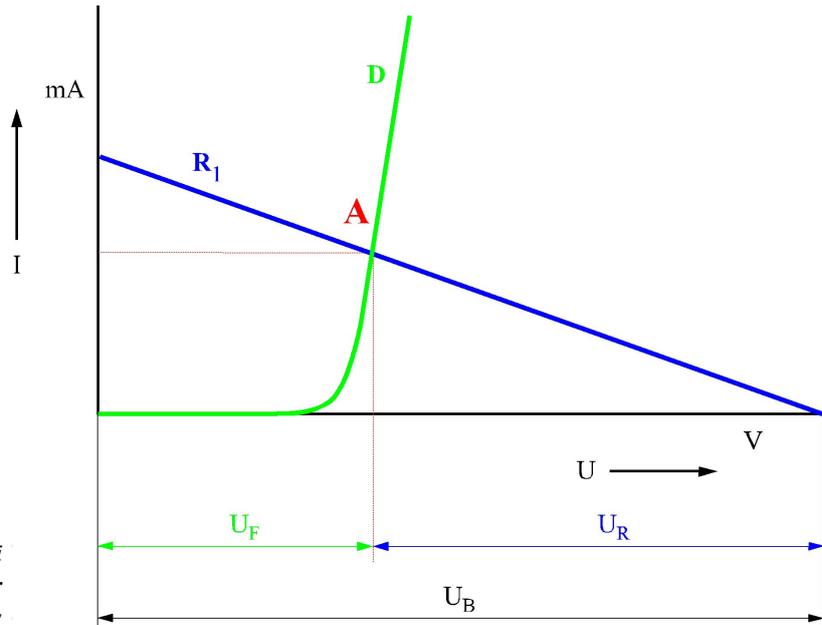


Abb.33: Arbeitspunktbestimmung bei der Reihenschaltung einer Diode und eines Widerstandes

## 2.7 Aufgaben zur Arbeitspunktbestimmung

### Aufgabe 4:

Beiliegend (Abb.34) ein Auszug aus dem Datenblatt einer Diode. Diese ist mit einem Widerstand von  $30\ \Omega$  in Reihe geschaltet. Die Spannungsquelle beträgt  $3\ \text{V}$ .

U in V	0,00	0,40	0,60	0,65	0,70
I in mA	0	1	10	40	80

Abb.34: Kenndaten einer Diode

- Bestimme die an der Diode und dem Widerstand anliegenden Spannungen. Welche Stromstärke fließt?
- Welche Werte erhält man wenn die Betriebsspannung auf  $2,6\ \text{V}$  sinkt? Trage die Widerstandsgerade in das Diagramm von Punkt a) ein.
- Welche Werte erhält man bei einer Betriebsspannung von  $2,6\ \text{V}$  und einem Widerstand von  $60\ \Omega$ ? Trage die Widerstandsgerade wiederum in das Diagramm von Punkt a) ein.

### Aufgabe 5:

Die Diode aus Aufgabe 4 wird mit einem Widerstand von  $200\ \Omega$  in Reihe geschaltet. Die Spannungsquelle beträgt  $20\ \text{V}$ .

Wie groß sind die an der Diode und dem Widerstand anliegenden Spannungen? Welche Stromstärke fließt?

### 3 Anwendungen von Dioden

#### 3.1 Schalter

Dioden werden in der Digitaltechnik oft als Schalter eingesetzt. Mit ihnen lassen sich logische Verknüpfungen umsetzen.

##### 3.1.1 ODER-Gatter

Haben einer der beiden Eingänge (Abb.1) der Schaltung den Zustand „1“ (z.B. +5V), so liegt am Ausgang der Zustand „1“ an.

Das Schaltzeichen der logischen ODER-Schaltung ist in Abb.2 dargestellt.

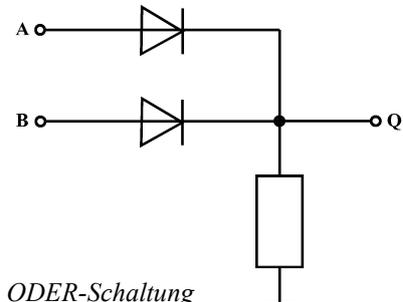


Abb.1: Logische ODER-Schaltung

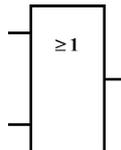


Abb.2: Schaltzeichen Logisches ODER

##### 3.1.2 UND-Gatter

Nur wenn beide Eingänge (Abb.3) der Schaltung den Zustand „1“ (z.B. +5V) haben, liegt am Ausgang der Zustand „1“ an.

Wenn einer der beiden Eingänge den Zustand „0“ hat (0 V), so liegt am Ausgang Q der logische Zustand „0“ an. Die Spannung am Ausgang entspricht dabei der Schwellspannung der Diode (ca.0,6 V).

Das Schaltzeichen der logischen Und-Schaltung ist in Abb.4 dargestellt.

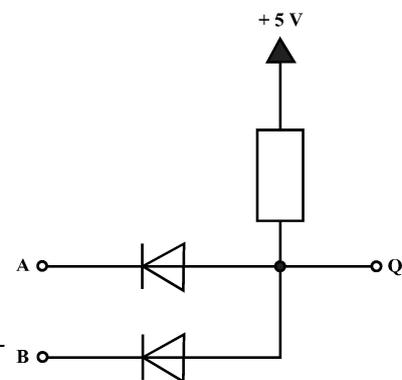


Abb.4: Logische UND-Schaltung

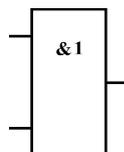


Abb.3: Schaltzeichen Logisches UND

#### 3.2 Gleichrichterschaltungen

In der Energietechnik werden neben Wechselspannungen auch Gleichspannungen benötigt, u.a. bei elektrischen Antrieben. Um aus Wechselspannungen Gleichspannungen herzustellen, werden sogenannte Gleichrichter verwendet.

Häufig wird zuvor mit einem Transformator eine höhere Wechselspannung in eine geringere Wechselspannung umgewandelt. (Abb.5)

Beispiel: Die 230 V Wechselspannung des öffentlichen Netzes wird im PC in eine 5 V Gleichspannung umgewandelt.

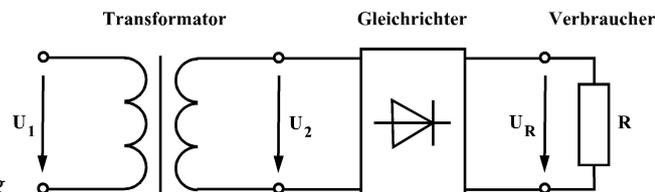


Abb.5: Gleichrichterschaltung

Es gibt mehrere Gleichrichterschaltungen, nachfolgend werden zwei Bauformen vorgestellt.

### 3.2.1 Einweg-Gleichrichter-Schaltung (M1)

Die Einweg-Gleichrichter-Schaltung (M1) ist die einfachste Gleichrichter-Schaltung, sie besteht quasi nur aus einer Gleichrichterdiode. Der Schaltplan der Schaltung ist in Abb.6 dargestellt.

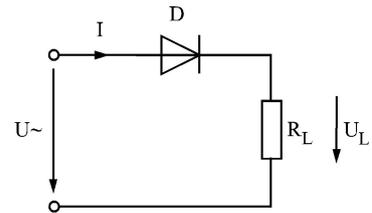


Abb.6: Einweg-Gleichrichter-Schaltung

Die Einweg-Gleichrichter-Schaltung läßt nur die positive Halbwelle der Wechselspannung (Abb.7) durch. Die negative Halbwelle wird gesperrt (Abb.8 und 9).

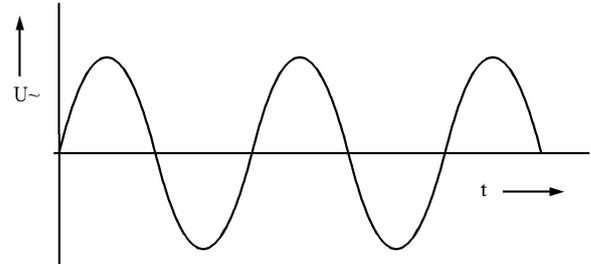


Abb.7: Wechselspannung am Eingang

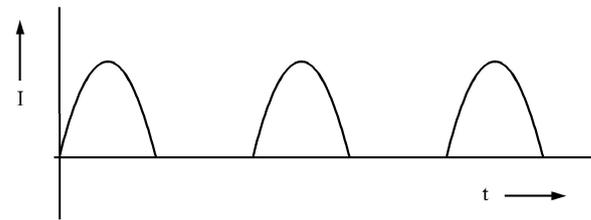


Abb.8: Strom am Ausgang

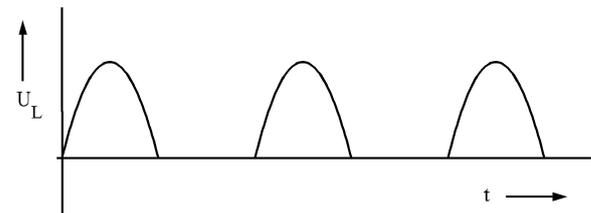


Abb.9: Spannung am Ausgang

Die Spannung am Ausgang besteht aus lauter positiven Halbwellen. Es ist noch keine Gleichspannung, es entstehen nur **Spannungsimpulse**. Deshalb man bezeichnet sie als **Mischspannung** oder **pulsierende Spannung**.

Einweg-Gleichrichter-Schaltungen werden nur bei kleinen Ausgangsleistungen verwendet.

### 3.2.2 Brücken-Zweiweg-Gleichrichterschaltung (B2)

Die Brücken-Zweiweg-Gleichrichterschaltung (B2) (Abb.10) bezeichnet man auch noch als Graetzschaltung.

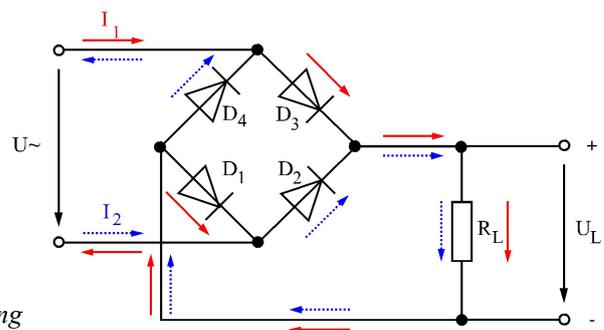


Abb.10: Brücken-Zweiweg-Gleichrichter-Schaltung

In nachfolgenden Abb. 11 bis 15 sind die Ein- und Ausgangsspannungen sowie die jeweils fließenden Ströme dargestellt.

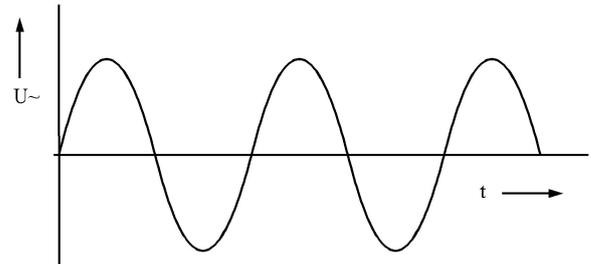


Abb.11: Eingangsspannung

Für die positiven Halbwellen der Ausgangsspannung sind die Dioden  $D_1$  und  $D_3$  in Durchlaßrichtung geschaltet.

Daher fließt ein Strom  $I_1$ .

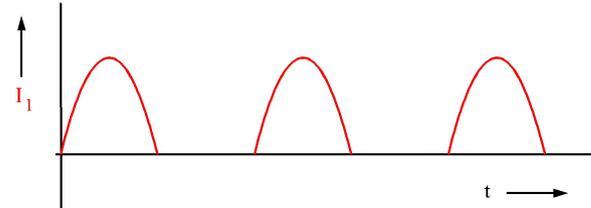


Abb.12: Strom durch positive Spannung

Für die negativen Halbwellen der Ausgangsspannung sind die Dioden  $D_2$  und  $D_4$  in Durchlaßrichtung geschaltet.

Daher fließt ein Strom  $I_2$ .

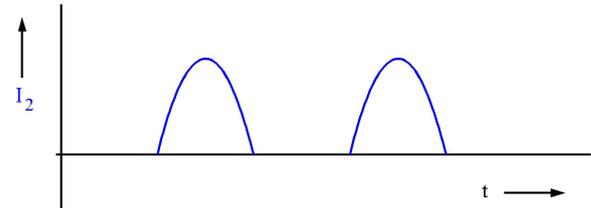


Abb.13: Strom durch negative Spannung

Die Ströme  $I_1$  und  $I_2$  fließen in gleicher Richtung durch den Lastwiderstand  $R_L$ . Gemeinsam stellen sie den Strom  $I$  dar.

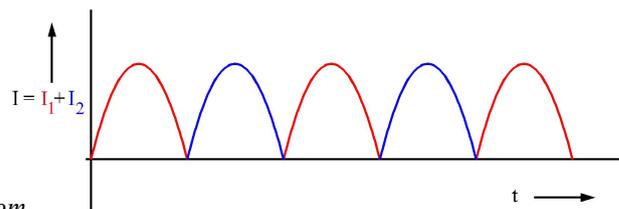


Abb.14: Ausgangsstrom

Die Ausgangsspannung  $U_L$  hat den gleichen zeitlichen Verlauf wie der Strom  $I$ .

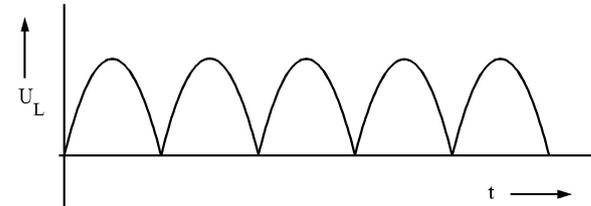


Abb.15: Ausgangsspannungen

Die Brücken-Zweiweg-Gleichrichter-Schaltung liefert ebenfalls eine pulsierende Gleichspannung. Gegenüber der Einweg-Gleichrichter-Schaltung hat sie den Vorteil daß beide Eingangs-Halbwellen ausgenutzt werden.

### 3.3 Glättung

Viele Verbraucher (z.B. Musikverstärker) können nicht mit pulsierenden Gleichspannungen betrieben werden. Die Ausgangsspannung muß daher **geglättet** werden.

Für kleine Leistungen (bis ca. 2 kW) werden hierzu **Kondensatoren** verwendet, bei großen Leistungen bis zu einigen 1000 kW kommen (**Glättungs**)**drosseln** zum Einsatz.

Bei Gleichrichterschaltungen mit Glättungskondensator wird dieser parallel zum Lastwiderstand eingefügt (Abb.16).

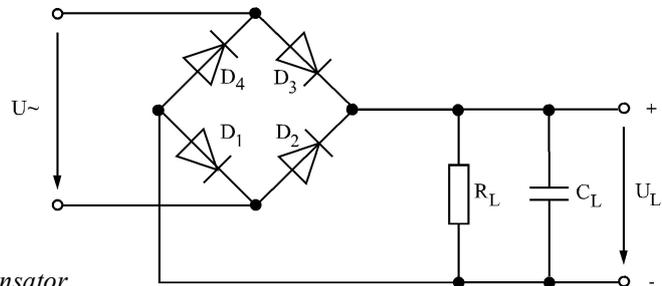


Abb.16: B2-Schaltung mit Ladekondensator

Der Kondensator lädt sich auf, solange die Dioden Strom durchlassen. Fällt die Spannung am Verbraucher unter die Kondensatorspannung, entlädt dieser sich und der Stromfluß am Lastwiderstand (Abb.17) wird geglättet

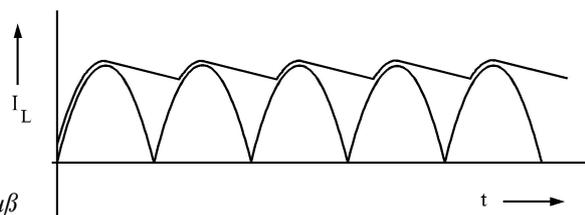


Abb.17: Geglätteter Stromfluß

## 4 Transistor

Transistoren sind Halbleiterbauelemente, die beispielsweise bei Schaltungen, der Verstärkung von Signalen (Rundfunk- oder Fernsehgerät), der Steuerungs- und Regelungstechnik oder der Erzeugung von Schwingungen verwendet werden.

Transistoren sind steuerbare Bauelemente, deren Widerstand in weiten Bereichen geändert werden kann (Transistor = „transfer resistor“).

Die meist kleinen Bauteile stellen die wichtigste Gruppe elektronischer Bauteile dar.

Am häufigsten werden bipolare Transistoren, und zwar NPN-Transistoren, verwendet. Deren Aufbau, Funktionsweise und Anwendungsmöglichkeiten sollen daher stellvertretend für andere Bauformen erläutert werden.

### 4.1 Aufbau und Wirkungsweise

NPN-Transistoren bestehen beispielsweise aus einem Silizium-Einkristall, der durch entsprechende Dotierung in zwei n-leitende und eine p-leitende Schicht (Abb.18) geteilt ist.

Die drei Schichten und deren Anschlüsse bezeichnet man als Emittor E, Basis B und Kollektor C:

- der Emittor liefert die Ladungsträger,
- die Basis steuert den Vorgang und
- der Kollektor sammelt die Ladungsträger wieder ein.

Die Bauweise bedingt daß zwei p-n-Übergänge vorliegen. Dabei wird die Grenzschicht BE in Durchlassrichtung und die Grenzschicht CB in Sperrrichtung (Abb.19) betrieben.

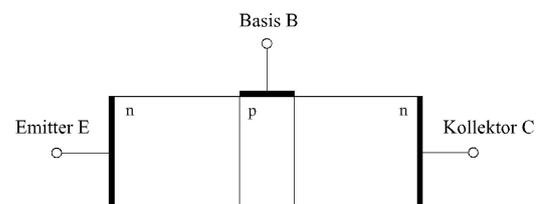


Abb.18: NPN-Transistor

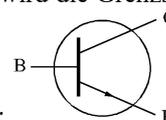


Abb.19: Schaltzeichen NPN-Transistor

Grundsätzlich ähnelt die Bauweise damit zwei gegenseitig geschalteten Dioden, ein Transistor kann jedoch nicht aus solchen aufgebaut werden.

Die Funktionsweise des Transistors soll an einer Schaltung (Abb.20) erklärt werden.

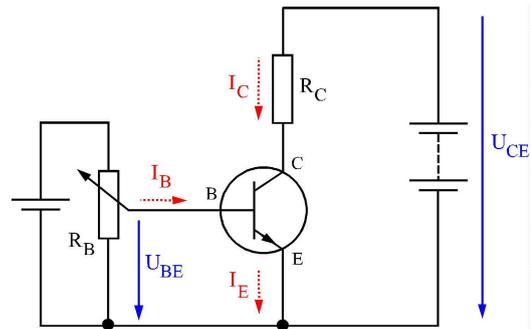


Abb.20: Transistorschaltung

Die unterschiedlichen Spannungen und Ströme werden in Form von Transistorkennlinien dargestellt.

#### 4.1.1 Eingangskennlinie

Die Eingangskennlinie (Abb.21) stellt den Zusammenhang zwischen dem Basisstrom  $I_B$  und der Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE}$  (zwischen Basis und Emitter) dar.

Man erkennt welcher Basisstrom bei einer bestimmten Spannung zwischen Basis und Emitter fließt. Der Verlauf entspricht dem einer in Durchlassrichtung betriebenen Diode. Bei Siliziumtransistoren besteht eine Schwellspannung von 0,65 V.

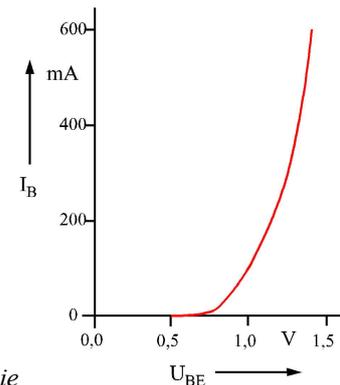


Abb.21: Eingangskennlinie

#### 4.1.2 Stromsteuerkennlinie

Die Steuerkennlinie (Abb.22) stellt den Zusammenhang zwischen dem Kollektorstrom  $I_C$  und dem Basisstrom  $I_B$  dar.

Ab dem Zeitpunkt wo ein Basisstrom fließt, d.h. nach Überwinden der Schwellspannung  $U_{BE}$ , fließt ebenfalls ein Kollektorstrom. Mit zunehmendem Basisstrom steigt der Kollektorstrom an. Das Verhältnis von Basisstromstärke zu Kollektorstromstärke bezeichnet man übrigens als **Stromverstärkung**.

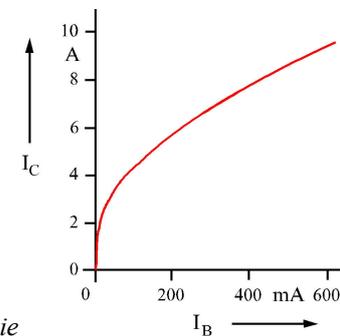


Abb.22: Steuerkennlinie

#### 4.1.3 Ausgangskennlinie

Die Ausgangskennlinie (Abb.23) stellt den Zusammenhang zwischen der Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  (zwischen Kollektor und Emitter) und dem Kollektorstrom  $I_C$  dar.

In einem weiten Bereich ist die Kollektorstromstärke nur geringfügig von der Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  abhängig. In diesem Bereich wird der Transistor betrieben.

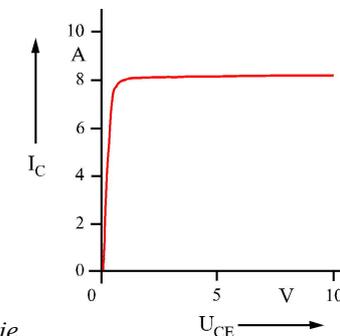


Abb.23: Ausgangskennlinie

Der Kollektorstrom  $I_C$  hängt vom Basisstrom  $I_B$  ab. Somit erhält man in Abhängigkeit des Basisstroms eine ganze Schar an Ausgangskennlinien (Abb.24).

### 4.1.4 Kennwerte

Alle Kennlinien eines Transistors werden häufig gemeinsam in einem Diagramm (Abb.24) dargestellt.

Hieraus lassen sich bei einer Schaltung für einen Arbeitspunkt die benötigten Werte ermitteln

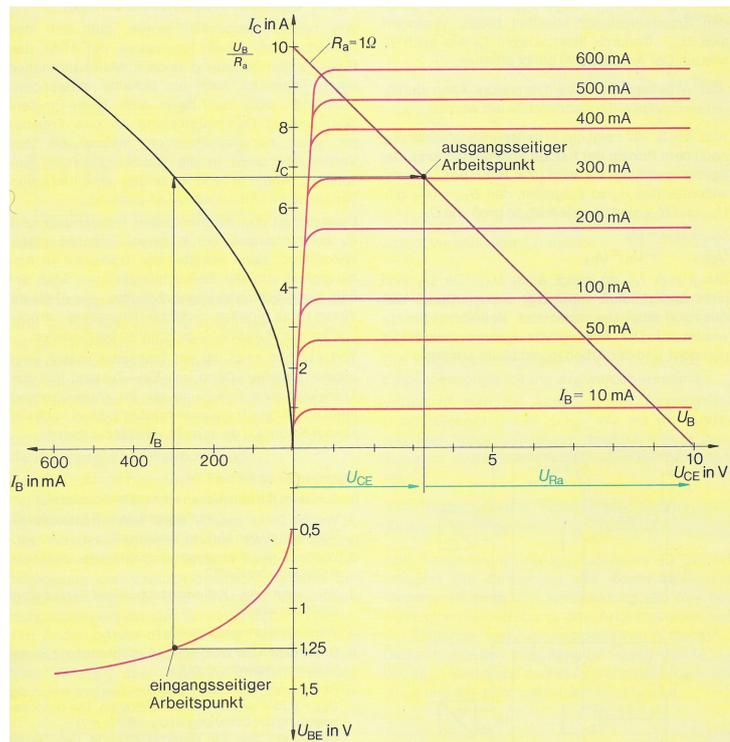


Abb.24: Kennwerte eines Transistors

## 4.2 Anwendungen

### 4.2.1 Schalter

Der Kollektorstrom eines Transistors lässt sich mit Hilfe der Basis-Emitter-Spannung steuern. Daher kann ein Transistor als Schalter eingesetzt werden (Abb.25). Der Verbraucher ist im Kollektorstromkreis.

Wird der Schalter geschlossen, fließt ein Basisstrom  $I_B$  und die Lampe leuchtet.

Ersetzt man den Schalter und den Widerstand  $R_1$  beispielsweise durch einen lichtabhängigen Widerstand, schaltet der Transistor in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke. Die Lampe leuchtet lichtabhängig.

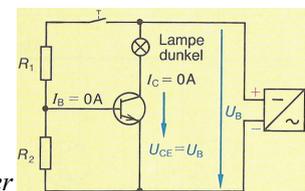


Abb.25: Transistor als Schalter

In ähnlicher Weise können einfache druck- oder temperaturabhängige Schalter hergestellt werden.

Der Nachteil des Transistors als Schalter besteht darin daß im „Aus“-Zustand noch ein kleiner Kollektorstrom fließt und im „Ein“-Zustand etwas Spannung am Transistor abfällt.

### 4.2.2 Verstärker

Ein Transistor kann Spannungen, Ströme und Leistungen verstärken. Daher wird er häufig zur Verstärkung von kleinen Wechsel- oder Gleichspannungen in elektronischen Schaltungen verwendet.

In Abb.26 ist die Verstärkung einer Wechselspannung dargestellt.

Die kleine Eingangsspannung  $U_{BE}$ , die nur etwas mehr als 0,7 V beträgt, wird auf eine Ausgangsspannung  $U_{CE}$  von ungefähr 15 V verstärkt.

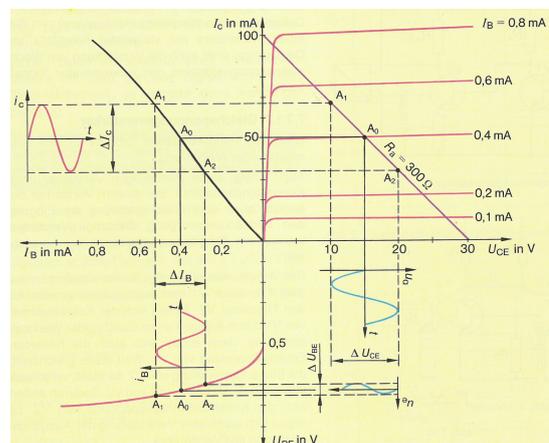


Abb.26: Transistor als Verstärker

Alle unedlen Metalle besitzen negative Standardpotentiale, d.h. sie lassen sich von Säuren,  $c(\text{H}_3\text{O}^+) = 1 \text{ mol/L}$ , unter Wasserstoffentwicklung zersetzen. Die edlen Metalle haben positive Redoxpotentiale und werden von verdünnten Säuren ( $c(\text{Säure}) = 1 \text{ mol/L}$ ) nicht angegriffen.

**Aufgabe 7:**

Schreibe nachfolgende galvanische Zellen richtig an:

Zinkblech in Zinksulfat mit Bleistab in Bleichlorid.

Kupferstab in Kupfer(I)chlorid mit Silber in Silbernitrat.

Die Potentialdifferenz zwischen zwei Halbzellen lässt sich mit Hilfe der elektrochemischen Spannungsreihe berechnen. Diese wird auch als Elektromotorische Kraft (EMK) bezeichnet. Sie rechnet sich aus der Differenz der elektrochemischen Spannungen der Halbzellen des Oxidationsmittels (welches Elektronen aufnimmt, Akzeptor) und des Reduktionsmittels (welches Elektronen abgibt, Donator).

**Potentialdifferenz** bzw.  
**Elektromotorische Kraft (EMK)** einer galvanischen Zelle.

$\Delta U^0$ : Potentialdifferenz in V

$U^0_{(\text{Akzeptor})}$ : Standardpotential des Oxidationsmittels in V

$U^0_{(\text{Donator})}$ : Standardpotential des Reduktionsmittels in V

**Aufgabe 8:**

Berechne die EMK folgender galvanischen Zelle:  $\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}/\text{Pb}^{2+}/\text{Pb}$

**Aufgabe 9:**

Gegeben ist folgende galvanische Zelle:  $\text{Cu}/\text{Cu}^+//\text{Ag}^+/\text{Ag}$

Gib die Redoxpaare an (vollständige Schreibweise als Gleichung, mit elektrochemischen Standardpotentialen).

Markiere die Richtungen der Reaktionen.

Markiere die Oxidationszahlen.

Wo findet die Oxidation statt?

Welche Elektrode ist die Anode?

Berechne die EMK.

**Anmerkungen:**

- Die Spannungsreihe mit den Standardpotentialen ermöglicht Voraussagen über das chemische Verhalten bestimmter Systeme.
- Je **negativer** das Standardpotential eines Redoxpaares ist, desto stärker wirkt seine reduzierte Form (das Metall bzw. die Nichtmetallionen) als **Reduktionsmittel**.  
Je **positiver** das Standardpotential eines Redoxpaares ist, desto stärker wirkt seine oxidierte Form (die Metallionen bzw. das Nichtmetall) als **Oxidationsmittel**.

### 3 Konzentrationsabhängigkeit der Elektrodenpotentiale

Bisher wurden die Potentiale immer nur auf Lösungen mit  $c = 1 \text{ mol/l}$  bezogen. Das Elektrodenpotential einer Halbzelle ist aber von der Konzentration der Ionenlösung abhängig, wie die Überlegungen in Abschnitt 2.2.1 (Seite 8) bereits zeigten. Um diese Abhängigkeit quantitativ zu untersuchen, betrachtet man die Spannung einer Konzentrationskette.

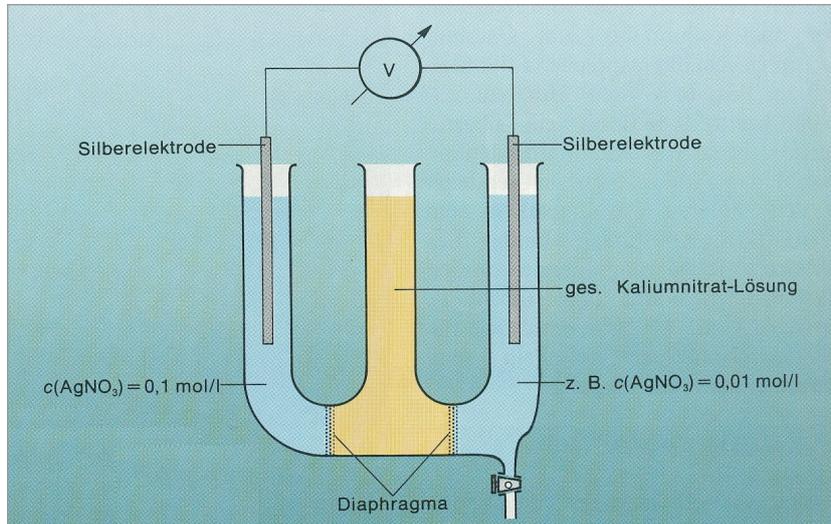


Abb.9: Silberkonzentrationskette

Als **Konzentrationskette** bezeichnet man folgende Anordnung (vgl. Abb.9): Zwei Elektroden desselben Metalls tauchen in unterschiedlich konzentrierte Lösungen des gleichen Salzes dieses Metalls ein. Die Lösungen sind leitend über ein Diaphragma oder eine neutrale Salzlösung (Stromschlüssel) verbunden. Der Stromschlüssel verhindert eine zu schnelle Vermischung der Metallionen, die zu einer Abnahme der Potentialdifferenzen führen würde, bei gleichzeitiger Stromleitung.

Wird nun die Spannung zwischen z. B. zwei Silberelektroden gemessen, so stellt man keine Potentialdifferenz fest. Nach Verdünnung der einen Silbernitratlösung auf  $c = 0,1 \text{ mol/l}$  lässt sich jedoch eine Spannung von ca. 59 mV feststellen. Die Elektrode mit der **verdünnten Lösung** erweist sich hierbei als **negativer Pol**.

Das Ergebnis stimmt mit den Erwartungen überein: in der Halbzelle mit der geringeren Konzentration gehen mehr Metallatome in Form von Metallionen in Lösung und lassen ihre Elektronen auf der Elektrode zurück. Das Gleichgewicht



liegt hier stärker auf der Seite der Silber-Ionen. Die Elektrode erhält so einen Elektronenüberschuss und wird zum Minus-Pol.

Messung	Lösung 1: $c_1 (\text{Ag}^+)$ in mol/l	Lösung 2: $c_2 (\text{Ag}^+)$ in mol/l	Konzentrations- verhältnis $\frac{c_1}{c_2}$	$\log \frac{c_1}{c_2}$	Spannung U in mV
1	$10^{-1}$	$10^{-1}$	1	0	0
2	$10^{-1}$	$10^{-2}$	10	1	59
3	$10^{-1}$	$10^{-3}$	100	2	118

Abb.10: Auswertung der Messungen an einer Konzentrationskette

Wird die verdünnte Lösung der Silberhalbzelle noch mehrmals um eine Zehnerpotenz verdünnt, so stellt man jeweils eine Erhöhung der Spannung um 59 mV fest. Die Spannung ist demnach proportional dem Logarithmus des Konzentrationsverhältnisses der Silber-Ionen in den beiden Halbzellen (siehe Abb.10).

$$U_{\text{konz}} \sim \log \frac{c_1}{c_2} \quad \text{Spannung der Konzentrationskette}$$

Dabei ist  $c_1$  die Konzentration der höher konzentrierten Lösung. Als Proportionalitätsfaktor kann für diese Konzentrationskette 0,059 bestimmt werden, so dass gilt:

$$U_{\text{konz}} = 0,059 \cdot \log \frac{c_1}{c_2}$$

Für eine Konzentrationskette mit zweifach positiven Ionen (z.B.  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) lässt sich 0,059/2 als Proportionalitätsfaktor ermitteln.

Allgemein gilt für Konzentrationsketten:

Spannung der **Konzentrationskette**  
des Systems



bei 25°C

$$U_{\text{konz}} = \frac{0,059}{z} \cdot \log \frac{c_1}{c_2}$$

$U_{\text{konz}}$ : Spannung der Konzentrationskette  
in V

$z$ : Anzahl der ausgetauschten  
Elektronen

$c_1$ : höhere Konzentration in mol/l

$c_2$ : niedrigere Konzentration in mol/l

**Beispiel:**

Wie groß ist die Spannung einer Konzentrationskette aus  $\text{AlCl}_3$  der Konzentrationen 1 mol/l und 0,001 mol/l ?

**Lösung:**



## 4 Nernstsche Gleichung und Anwendungen

### 4.1 Nernstsche Gleichung

Das Elektrodenpotential von beliebig konzentrierten Halbzellen kann mit Hilfe der Konzentrationsketten berechnet werden. Das Standardpotential wird dabei um das Potential der entsprechenden Konzentrationskette verringert (Abb.11):

$$U = U^0 - U_{\text{konz}}$$

$$U = U^0 - \frac{0,059}{z} \cdot \log \frac{c_1}{c_2}$$

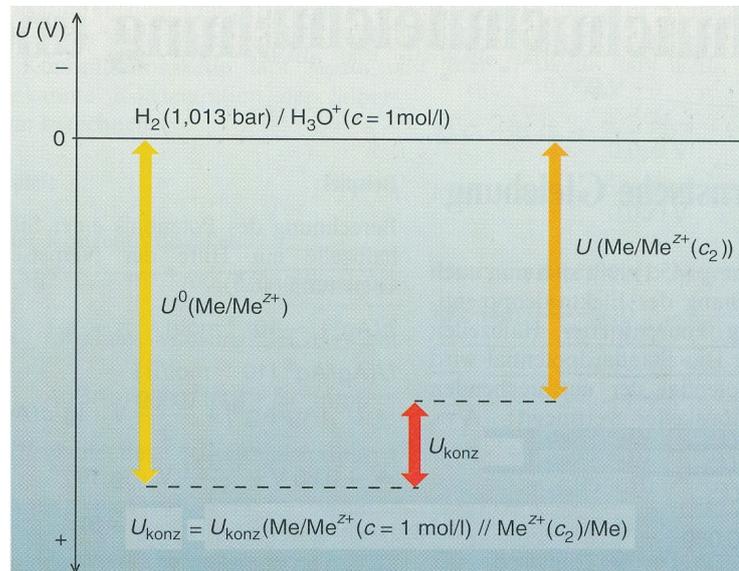
Wenn  $c_1 = 1 \text{ mol/l}$  und  $c_1 > c_2 = c(\text{Me}^{z+})$  ist (siehe Abb.10), dann gilt:

$$U = U^0 - \frac{0,059}{z} \cdot \log \frac{1}{c(\text{Me}^{z+})}$$

$$U = U^0 - \frac{0,059}{z} \cdot (-\log c(\text{Me}^{z+}))$$

$$U = U^0 + \frac{0,059}{z} \cdot \log c(\text{Me}^{z+})$$

Abb.11: Ermittlung des Elektrodenpotentials der Halbzelle  $\text{Me}/\text{Me}^{z+}(c_2 < 1 \text{ mol/l})$



Dies ist die **Nernstsche<sup>1)</sup> Gleichung** für Metallelektroden. Präzise formuliert lautet sie :

Nernstsche Gleichung für Metallelektroden:

$$U(\text{Me}/\text{Me}^{z+}(c)) = U^0(\text{Me}/\text{Me}^{z+}) + \frac{0,059}{z} \cdot \log c(\text{Me}^{z+})$$

U: Spannung der Halbzelle in V  
 U<sup>0</sup>: Standardpotential der Halbzelle in V  
 z: Anzahl der ausgetauschten Elektronen  
 c: Konzentration der Lösung in mol/l

#### **Beispiel:**

Berechne das Potential einer Silberhalbzelle der Konzentration  $10^{-3} \text{ mol/l}$ .

#### **Lösung:**

#### **Anmerkung:**

Die Nernstsche Gleichung lässt sich auch für Nichtmetallhalbzellen aufstellen. Sie lautet:

$$U(2\text{X}^{z-}(c)/\text{X}_2) = U^0(2\text{X}^{z-}/\text{X}_2) - \frac{0,059}{z} \cdot \log c(\text{X}^{z-})$$

<sup>1)</sup> Walther Nernst (1864-1941), deutscher Physiker und Chemiker, Arbeitsgebiete Elektrochemie und Thermodynamik, 1920 Nobelpreis der Chemie für 3. Hauptsatz der Thermodynamik



## 4.2 Spannung beliebiger Galvanischer Zellen

Die Nernstsche Gleichung ermöglicht die Berechnung von Spannungen beliebiger Galvanischer Zellen. Man bildet die Differenz der Potentiale der beiden Halbzellen. Um eine positive Zellspannung zu erhalten, muss das kleinere Potential vom größeren subtrahiert werden.

### Beispiel:

Berechne die Spannung, die eine Galvanische Zelle mit folgenden Halbzellen liefert:

Zn/Zn<sup>2+</sup>(10<sup>-4</sup>mol/l) und Pb/Pb<sup>2+</sup>(0,1mol/l)

Schreibe die Galvanische Zelle richtig an.

### Lösung:

$$\begin{aligned} U(\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}(10^{-4}\text{mol/l})) &= -0,76\text{V} + \frac{0,059}{2} \cdot \log 10^{-4} \\ &= -0,88\text{V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U(\text{Pb}/\text{Pb}^{2+}(0,1\text{mol/l})) &= -0,13\text{V} + \frac{0,059}{2} \cdot \log 10^{-1} \\ &= -0,16\text{V} \end{aligned}$$

Der Elektronendruck des Redoxpaares  $\text{Pb}^{2+}/\text{Pb}$  ist größer. Daher erhält man:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{ges}} &= U(\text{Pb}/\text{Pb}^{2+}) - U(\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}) \\ &= -0,16\text{V} + 0,88\text{V} \end{aligned}$$

$$\Delta U_{\text{ges}} = 0,72\text{V}$$

Die Bleihalbzelle stellt den positiven, die Zinkhalbzelle den negativen Pol dar, die Potentialdifferenz d.h. die Spannung zwischen den Polen beträgt 0,72V.

Bezeichnung der Galvanischen Zelle: Zn/Zn<sup>2+</sup>(10<sup>-4</sup>mol/l)//Pb<sup>2+</sup>(0,1mol/l)/Pb

### Aufgabe 9:

Berechne die Spannung, die eine Galvanische Zelle mit folgenden Halbzellen liefert:

Li/Li<sup>+</sup>(10<sup>-1</sup> mol/l) und Cs/ Cs<sup>+</sup>(10<sup>-4</sup> mol/l)

Schreibe die Galvanische Zelle richtig an.

Welche Elektrode ist die Anode?

### Aufgabe 10:

Berechne die Spannung, die eine Galvanische Zelle mit folgenden Halbzellen liefert:

Au/Au<sup>3+</sup>(0,1 mol/l) und Al/Al<sup>3+</sup>(0,001mol/l)

Schreibe die Galvanische Zelle richtig an.

Welche Reaktion läuft an der Anode ab?



## 5 Elektrochemische Stromerzeugung

Die Geschichte der elektrochemischen Energiespeicher begann mit der naturwissenschaftlichen Untersuchung der Elektrizität. Namen wie Luigi Galvani (1737-1798) und Alessandro Cont di Volta (1745-1827) sind mit diesen Arbeiten verbunden und leben noch heute in Bezeichnungen, wie "galvanische Zelle" und "Volt" fort. Galvani fiel bei Experimenten 1789 auf, dass Froschbeine zu zucken beginnen, wenn sie mit zwei verschiedenen Metallen in Berührung kommen. Er schloss daraus auf einen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Muskeltätigkeit. Zehn Jahre später baute Volta die erste einfache Batterie: Er schichtete Kupfer- und Zinkscheiben abwechselnd übereinander und legte zwischen die Scheiben jeweils ein in Salzlösung getränktes Stück Pappe. Diese "Volta'sche Säule" lieferte Energie, wenn die Scheiben durch Draht verbunden wurden. Die Spannung ließ sich mit mehreren in Reihe geschalteten Säulen noch erhöhen.

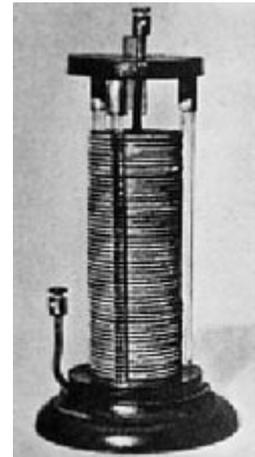


Abb.12: „Rittersche Säule“ (1802)

### 5.1 Trockenelemente, Batterien

Galvanische Zellen sind in der Technik zur Erzeugung von Spannungen bzw. Strom von Bedeutung, und zwar insbesondere, wenn bewegliche Spannungsquellen benötigt werden (für Taschenlampen, Kofferradios, Belichtungsmesser usw.).

Die ersten elektrochemischen Stromquellen waren reine Galvanische Zellen. So ist z. B. das **Daniell<sup>1)</sup>-Element** eine Galvanische Zelle, bestehend aus einer Zink- und einer Kupfer-Halbzelle (vgl. Abb.4). Durch die Entwicklung des **Trockenelements** gelang es, die Gefahr des Auslaufens des **Elektrolyten<sup>2)</sup>** zu verringern.

#### 5.1.1 Leclanché-Element

Der Franzose Leclanché<sup>3)</sup> entwickelte 1836 ein nach ihm benanntes Trockenelement, das **Leclanché-Element**, nach dessen Prinzip auch heute noch die Taschenlampenbatterie aufgebaut ist (Abb.13). (Eigentlich sollte man diese als **Trockenelement** bezeichnen, denn eine **Batterie** ist die **Hinterreiherschaltung mehrerer Elemente**, wobei sich die Spannungen addieren.)

Sie besteht aus einem **Zinkbecher**, der mit einer eingedickten Elektrolytmasse aus **Ammoniumchlorid, Zinkchlorid und Bindemitteln** gefüllt ist. In die Mitte taucht ein **Graphitstab**, der von **Mangandioxid** (Mangan(IV)-oxid) (Braunstein) umgeben ist. Insgesamt wird die Batterie von verschiedenen Schutzschichten eingehüllt.

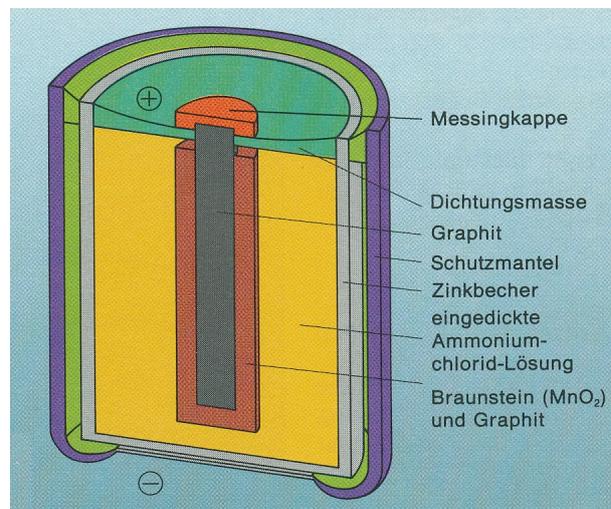
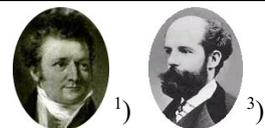


Abb.13: Trockenelement

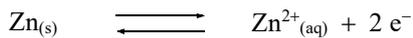
<sup>1)</sup> John Frederick DANIELL (1790-1845), englischer Physiker, Chemiker und Meteorologe

<sup>2)</sup> Elektrolyte = Stoffe die einer elektrolytischen Dissoziation unterliegen d.h. die in der Schmelze oder in Lösungen den elektrischen Strom leiten

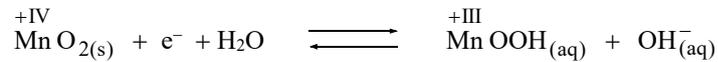
<sup>3)</sup> Georges LECLANCHÉ (1839-1882), französischer Chemiker



Die Zinkelektrode besitzt den größeren Elektronendruck und bildet die Anode (den Minuspol):



Der Graphitstab wird zum Pluspol. Die Vorgänge, die hierbei eine Rolle spielen, sind komplex und sollen daher nur vereinfacht dargestellt werden: Das Mangan mit der Oxidationszahl +IV geht unter Elektronenaufnahme in Mangan mit der Oxidationszahl +III über:



Die entstehenden Ionen ( $\text{OH}^{-}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) würden bereits nach kurzer Zeit die Redoxgleichgewichte so beeinflussen, dass die Zellspannung stark sinken würde.

Das **Ammoniumchlorid** im Trockenelement bewirkt jedoch in Folgereaktionen (Abb.14) durch Ausfällung der Reaktionsprodukte die Aufrechterhaltung der Spannung der Zelle.

Die  **$\text{OH}^{-}$ -Ionen** bilden mit den **Ammonium-Ionen** **Ammoniak**, das mit den **Zink-Ionen** eine schwerlösliche Koordinationsverbindung eingeht. Durch die Entstehung der schwer löslichen Niederschläge verringert sich die Leitfähigkeit innerhalb der Batterie, so dass die gelieferte Spannung (bei einer neuen Trockenbatterie ca. 1,5 V) mit der Zeit (Abb.15) sinkt.

Ein Teil der **Zink-Ionen** reagiert jedoch in einer weiteren Folgereaktion mit  **$\text{OH}^{-}$ -Ionen** zu **Zinkhydroxid**, das sich allmählich in Zinkoxid und Wasser umwandelt. Während des Betriebes der Batterie wird der Zinkmantel daher langsam von innen aufgelöst, es besteht die Gefahr des Auslaufens.

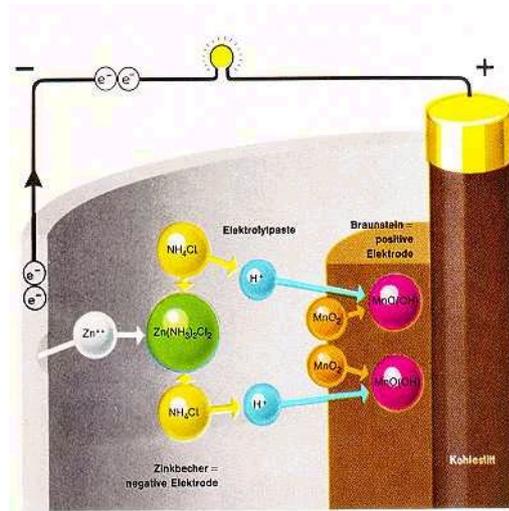


Abb.14: Vorgänge im Leclanché-Element

Ein Aufladen (vgl. Bleiakku, Kap.5.2) ist aufgrund der irreversiblen Vorgänge beim Entladen nicht möglich.

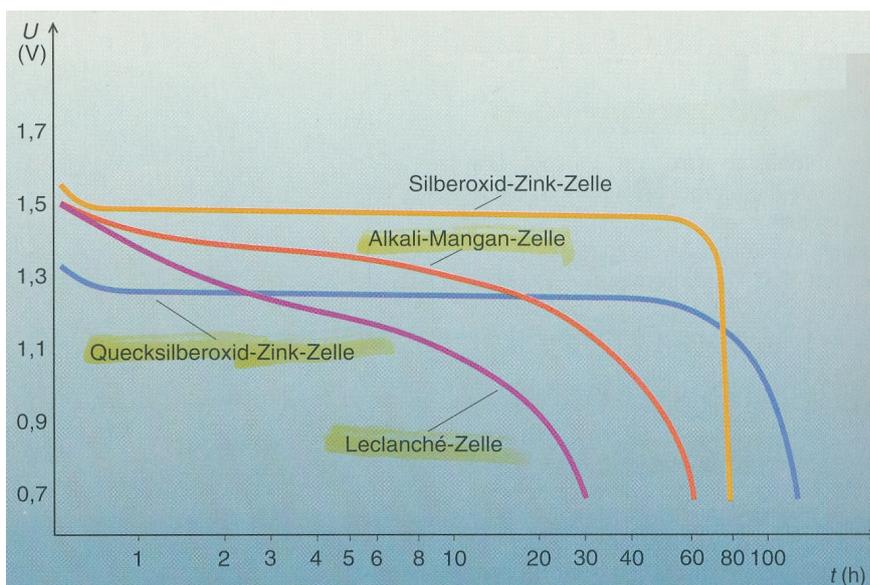


Abb.15: Entladekurven verschiedener Batterien

### 5.1.2 Alkaline-Batterie

Eine Weiterentwicklung des Leclanché-Trockenelementes stellt die **Alkaline-Batterie** (Abb.16) dar. Sie unterscheidet sich von ihm in folgenden Punkten:

- als **Elektrolyt** wird Kalilauge verwendet
- an der **positiven Elektrode** wird das **Mangandioxid** (Mangan(IV)-oxid) in zwei Stufen zum Mangan(II)-hydroxid reduziert:

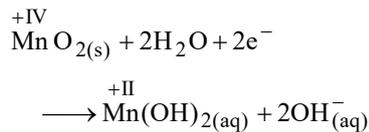
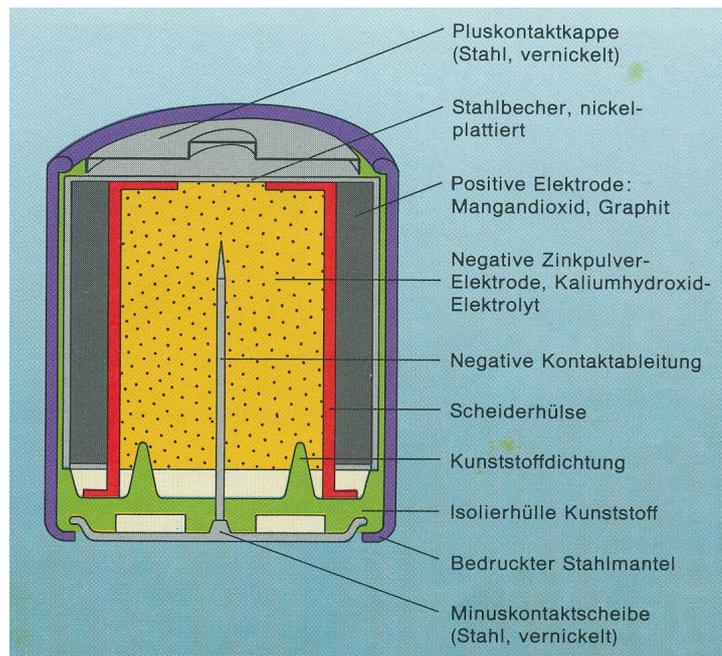
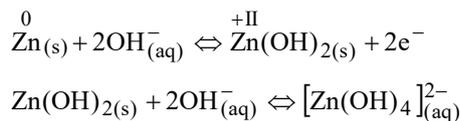


Abb.16: Aufbau einer Alkaline-Batterie



- an der **negativen Elektrode** erfolgt die Oxidation des Zinks unter Bildung von Zinkhydroxid, das sich im Laugenüberschuss löst:

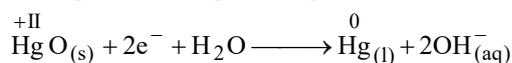


Man verwendet als Elektrode keinen Becher aus Zinkblech, sondern mit Lauge getränktes, amalgamiertes Zinkpulver.

- die **räumliche Anordnung** der Elektroden ist umgekehrt: die Zinkelektrode befindet sich im Innern, das Mangan(IV)-oxid als Ring außen herum. Die Spannung beträgt ebenfalls ca. 1,5 V, die Eigenschaften der Batterie sind jedoch wesentlich verbessert gegenüber dem Leclanché-Element: Längere Lebensdauer (Abb.13), geringerer Spannungsabfall, kein Auslaufen.

### 5.1.3 Quecksilberoxidbatterie

Eine kleine Trockenbatterie, die in kleinen Geräten (Hörgeräten, Uhren, Fotoapparaten mit Belichtungsmesser) verwendet wird, ist die Quecksilberoxidbatterie (Abb.17). Ebenso wie beim Leclanché-Element bildet Zink den Minuspol. Am Pluspol erfolgt die Reduktion von Quecksilberoxid:



Ein weiterer Vorteil der Quecksilberoxidbatterie ist neben der geringen Größe die Tatsache, dass die erzeugte Spannung von ca. 1,2 V über längere Zeit nur wenig absinkt, da sich beim **Entladen Quecksilber** bildet, das die Leitfähigkeit im Inneren nicht verschlechtert. Wegen der Giftigkeit des Quecksilbers kann es durch gebrauchte Quecksilberoxidbatterien zu Umweltbelastungen kommen. Alle alten Batterien sollten gesondert gesammelt und entsorgt werden.

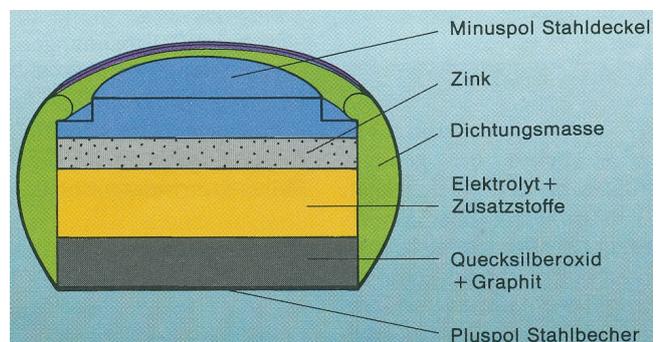


Abb.17: Quecksilberoxid-Batterie

### 5.1.4 Zink-Silberoxid-Batterie

Zink-Silberoxidbatterien (Abb.18) funktionieren ähnlich wie Quecksilberoxid-Batterien. Sie werden ebenfalls in Form von Knopfzellen gebaut, wobei das Silberoxid als positive Elektrode dient.

Der wesentliche Vorteil gegenüber Quecksilberoxid-Batterien liegt darin daß hier das Schwermetall Quecksilber nicht gebraucht wird.

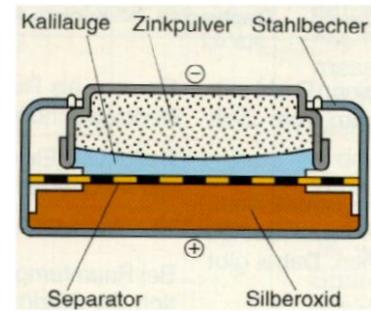


Abb.18: Zink-Silberoxid-Batterie

## 5.2 Akkumulatoren

Eine große Bedeutung besitzen Batterien, bei denen die Elektrodenvorgänge nach dem Entladen durch Anlegen eines Stromes wieder umgekehrt werden können. Solche Elemente lassen sich also regenerieren d.h. aufladen. Man bezeichnet sie als **Akkumulatoren**.



Abb.19: Elektromobil "Baker-Runabout" (1893) (Varta)

### 5.2.1 Bleiakкумулятор

Der Bleiakкумулятор wurde bereits im Jahre 1859 von Plante <sup>1)</sup> entwickelt und wird noch heute als Autobatterie verwendet.

Ein Bleiakku besteht im einfachsten Falle aus einer **Blei-** und einer **Blei(IV)-oxid-Elektrode** mit Schwefelsäure als Elektrolyt (Abb.20).

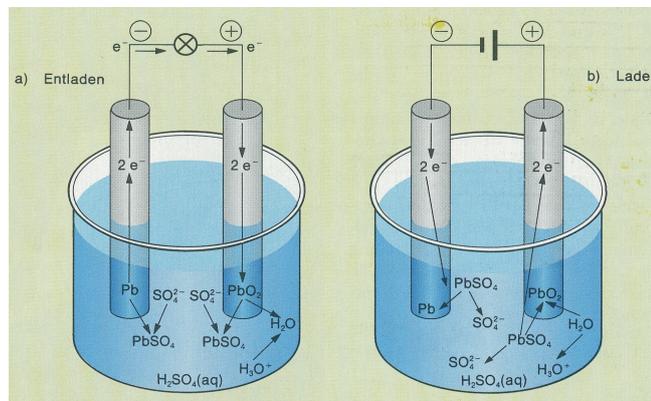


Abb.20: Modell eines Bleiakkus

Die Potentiale kommen durch nachfolgend beschriebene Reaktionen zustande:

#### Entladen:

Bei Inbetriebnahme des Bleiakkus überziehen sich beide Elektroden mit einer Schicht von **schwerlöslichem Blei(II)-sulfat**.

<sup>1)</sup> Gaston PLANTE (1834-1889), französischer Physiker.  
Erfinder der 1. Bleibatterie



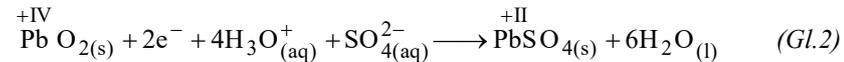
Zwischen beiden Elektroden ist eine Spannung von ca. 2 V festzustellen: die **Bleielektrode** bildet den **Minuspol**, die Blei(IV)-oxid- oder **Bleiodioxidelektrode** den **Pluspol**

**Entladen:**

Anode (Minuspol):



Kathode (Pluspol):

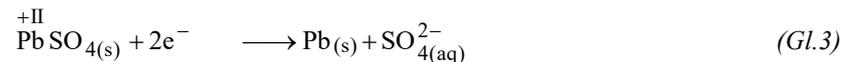
**Laden:**

Durch Anlegen einer äußeren Spannung lässt sich der Bleiakku regenerieren. Sein Minuspol wird an den Minuspol, sein Pluspol an den Pluspol der Spannungsquelle angeschlossen.

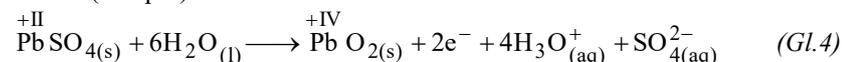
Beim Laden werden die Bleielektrode (Gl.3) bzw. die Blei(IV)-oxidelektrode (Gl.4) zurückgebildet.

**Laden:**

Kathode (Minus-Pol):



Anode (Pluspol):



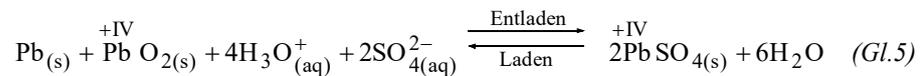
Der Anteil der Schwefelsäure in der Lösung nimmt dabei zu, die Säuredichte steigt von  $\rho = 1,17 \text{ g/cm}^3$  auf  $\rho = 1,25 \text{ g/cm}^3$  an.

Gegen Ende des Ladevorgangs läuft parallel eine **Elektrolyse** ab, bei der **Wasserstoff** und **Sauerstoff** entstehen. Daher ist es wichtig, ab und zu Wasser nachzufüllen und beim Aufladen nicht zu rauchen!

Da beim Entladen Schwefelsäure verbraucht, beim Laden zurückgebildet wird, ist es möglich, durch Messung der **Dichte der vorhandenen Schwefelsäure** den **Ladungszustand des Akkus** zu bestimmen.

**Gesamtreaktion:**

Laden und Entladen sind die Umkehrung ein und derselben Gesamtreaktion (Gl.5).



Hierbei läuft der **Entladevorgang freiwillig** ab, während der Ladevorgang durch eine äußere Spannung erzwungen wird. Der Bleiakku speichert die elektrische Energie, die beim Laden aufgewendet wird, in Form von chemischer Energie und gibt sie bei Bedarf wieder ab.

Die Zellenspannung ergibt sich aus der Differenz der Elektrodenpotentiale. Diese sind abhängig von der **Konzentration der  $\text{Pb}^{2+}$ -Ionen**, die wiederum von der Sulfat-Ionen-Konzentration und damit der Schwefelsäure-Konzentration abhängen. Die Spannung einer Zelle beträgt etwa 2 V.

Die Entladung des Akkus ist ein chemischer Vorgang und damit von der **Temperatur abhängig**. Da die Reaktionsgeschwindigkeit mit abnehmender Temperatur fällt, ist besonders im Winter auf einwandfrei geladene Batterien zu achten.

**Technische Anwendung:**

In den technisch verwendeten Bleiakkus sind meistens drei, sechs oder sogar zwölf der dargestellten Zellen hintereinandergeschaltet, so dass Spannungen von 6 V, 12 V und 24 V erzeugt werden können. Als Elektroden werden Platten mit großer Oberfläche verwendet (Abb. 21).

Die Bleiplatten sind zur Vergrößerung der Oberfläche wabenförmig ausgebildet. Sie tauchen in etwa 35%ige Schwefelsäure ein.

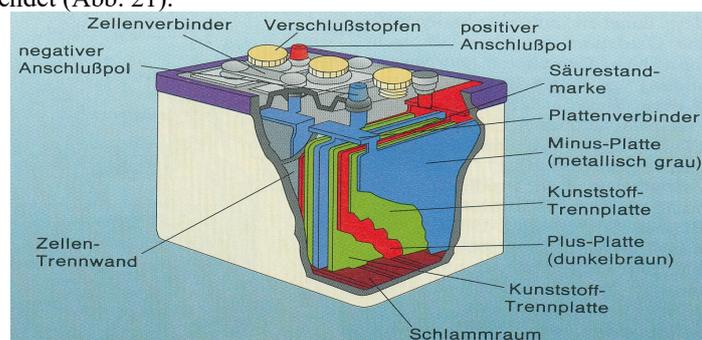


Abb. 21: Bleiakкумулятор

### 5.2.2 Nickel-Cadmium-Akku

Bereits 1901 wurden die ersten Patente für **Nickel-Cadmium-Akkus** angemeldet. Mit beginnender Entwicklung von mobilen PCs bedurfte es kleiner, leichter und leistungsstarker Akkus. Sie sind zudem pflegeleichter als Bleiakkus und besitzen eine größere Lebensdauer, die Herstellung ist jedoch teurer.



Abb.22: Nickel-Cadmium-Akku (1950)

Eine Nickel-Cadmium-Zelle (Abb.22 und 23) besteht aus einer negativen Cadmium- und einer positiven Nickel-Hydroxid-Elektrode. Als Elektrolyt wird Kaliumhydroxid verwendet.

Entladen:



Laden:



Die Zelle erzeugt eine Spannung von ca. 1,3 V.

Wegen des hochgiftigen Schwermetalls Cadmium ist die Zelle in einem gasdichten Gehäuse.

Das hochgiftige Schwermetall Cadmium stellt bei der Entsorgung alter Akkus ein Umweltproblem dar. Aufgrund der relativ geringen Herstellungskosten (Nickel und Cadmium sind preisgünstige Materialien) und der sehr hohen Belastbarkeit werden sie heute vorwiegend in Akku-Werkzeugen, Videokameras und schnurlosen Telefonen verwendet.

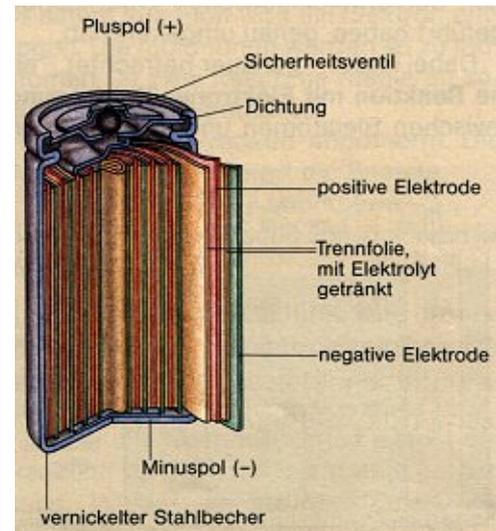


Abb.23: Nickel-Cadmium-Akku

### 5.2.3 Lithium-Ionen-Akku

Lithium ist das Alkalimetall mit der kleinsten Molmasse und steht mit einem Standard-Redoxpotential von  $-3,045 \text{ V}$  am negativen Ende der elektrochemischen Spannungsreihe. **Lithium** bietet sich daher als negatives Elektrodenmaterial mit besonders **hoher Speicherkapazität** an.

Dem gegenüber stehen die Nachteile, dass Lithium mit wässrigen Elektrolyten nicht kombiniert werden kann, sondern nur mit organischen Elektrolyten oder Salzschnmelzen. Zusätzlich sind die Lithium-Ionen, die während der Elektronenreaktion gebildet werden, hochlöslich, so dass eine Elektrode aus Lithium-Metall beim Entladen vollständig aufgelöst wird.

Die Entwicklung von Akkus beruht auf der Entdeckung, dass Lithium mit bestimmten Graphitsorten sogenannte **Interkalationsverbindungen** bildet, bei denen die Lithium-Ionen in das **Schichtgitter von Kohlenstoff** bei gleichzeitiger Elektronenaufnahme oder -abgabe eingelagert sind. Die Absorption von Lithium entspricht dem Laden, die Freisetzung von Lithium-Ionen dem Entladen dieser negativen Elektrode.

An dieser negativen Elektrode gibt es Einlagerungsverbindungen von Lithium in bestimmten Oxiden mit Schichtstrukturen, beispielsweise in Mangan-, Lithium- oder Kobaltoxiden.

Die Kathode besteht aus Graphit, als Elektrolyt werden viele verschiedene Flüssigkeiten verwendet.

Das System kann eine große Anzahl von Lade- und Entladezyklen leisten. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Zellenspannung von etwa  $3,6 \text{ V}$ , dies bei einer hohen Energiedichte von  $120 \text{ Wh/kg}$ .

Die Verwendung dieses Akkus in Form kleiner zylindrischer Zellen steigt derzeit sprunghaft an. Sie werden hauptsächlich für mobile Telefone, Computer und Camcorder eingesetzt. Gleichzeitig werden große Zellen mit Kapazitäten bis zu  $60 \text{ Ah}$  für Elektro- und Hybrid-Fahrzeuge entwickelt.

Neuartige Lithium-Ionen-Akkus ( $\text{Li Fe PO}_4$ ) speichern fünfmal mehr Energie und können dabei innerhalb von nur 5 Minuten auf 90 Prozent ihrer Kapazität geladen werden. Sie sind damit leistungsfähiger, sicherer, billiger und enthalten keine giftigen Schwermetalle.

### 5.2.4 Lithium-Polymer-Akku

Weitere Forschungsarbeiten an dem starken Reduktionsmittel Lithium führten zu der Weiterentwicklung vom Lithium-Ionen-Akku zum **Lithium-Polymer-Akku**.

Als Anode werden hierbei ebenfalls Lithium-Metalloxide und als Kathode Graphit verwendet. Gegenüber dem flüssigen Elektrolyten der Lithium-Ionen-Akkus haben Lithium-Polymer-Akku jedoch einen **festen Elektrolyten** auf Polymerbasis, in Form einer dünnen (weniger als 0,1 mm) Folie. Die ausreichende Ionenleitfähigkeit dieser Folie ist ab einer Betriebstemperatur von 60°C gegeben.

Modernste Lithium-Polymer-Akkus verwenden als Elektrolyten ein Gel, das bereits bei Raumtemperatur genügend Leitfähigkeit aufweist.

Die festen Lithium-Polymer-Akkus haben höhere Energiedichten als Lithium-Ionen-Akkus. Sie können in nahezu jeder Bauform (Abb.24 und 25) hergestellt werden.

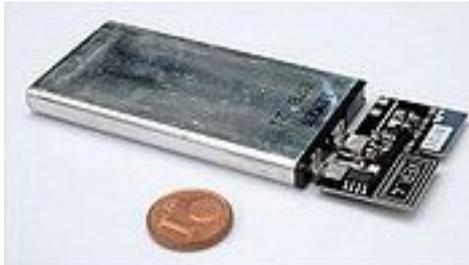


Abb.24: Lithium-Polymer-Akku



Abb.25: Geöffneter Akku

Die anfangs hohen Herstellungskosten sind mittlerweile durch große Produktionsmengen gesunken.

Nachteilig sind die elektrische und thermische Empfindlichkeit. Entsprechende Schutzschaltungen gegen **Tiefentladungen** und **Überladen** werden teilweise bereits in den Akku mit eingebaut.

Lithium-Polymer-Akkus haben sich im Modellbau (Autos, Flugzeuge) bereits überwiegend durchgesetzt.

### 5.3 Brennstoffzellen

In Brennstoffzellen wird die Verbrennungsenergie (chemische Energie) direkt in elektrische Energie umgewandelt. Sie haben den Vorteil, dass im Gegensatz zu den bisher besprochenen Zellen der **Betrieb** durch kontinuierliche Zufuhr der Ausgangsstoffe **dauerhaft aufrechterhalten** wird.

Der **Wirkungsgrad** liegt zurzeit bei ca. **70%** und ist damit weit höher als bei allen anderen Methoden der Energieerzeugung.

Darüber hinaus besitzt die Brennstoffzelle weitere Vorteile: Sie ist umweltfreundlich, d.h. es fallen **keine umweltbelastenden** Stoffe an und sie arbeitet **geräuschlos**. In der Raumfahrt wurden Brennstoffzellen bereits erfolgreich verwendet und zurzeit arbeitet man an der Entwicklung von Brennstoffzellen als Antrieb von Fahrzeugen.

Als Beispiel einer Brennstoffzelle soll hier die **Wasserstoff-Sauerstoff-Zelle** (Abb.26) kurz vorgestellt werden. Als Elektroden verwendet man Nickeldrahtnetze, die mit feinverteiltem Palladium überzogen sind.

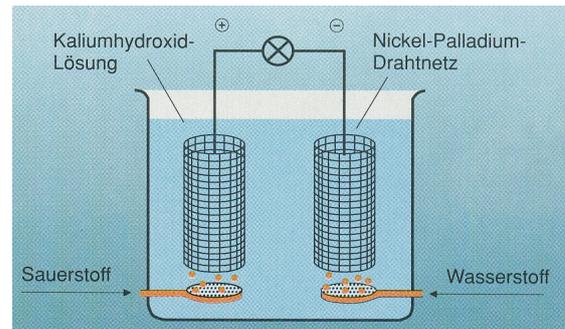
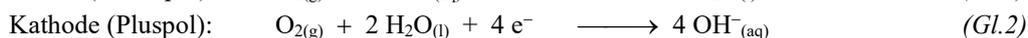
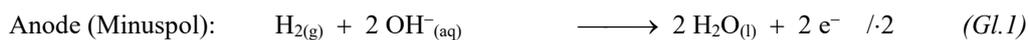
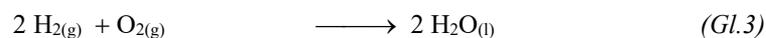


Abb.26: Wasserstoff-Sauerstoff-Zelle

Die Reaktionen laufen nach Gl.1 bis 3 ab.



Gesamt:



In der Wasserstoff-Sauerstoff-Zelle wird also die stark exotherme Knallgasreaktion direkt zur Stromerzeugung verwendet. Hierbei sind die Oxidation des Wasserstoffs und die Reduktion des Sauerstoffs räumlich voneinander getrennt, und die übertragenen Elektronen fließen über den Verbraucher.

Man verwendet poröse Elektroden, in deren Poren die stromliefernden Reaktionen an einer **Dreiphasengrenze** ablaufen (Abb. 27).

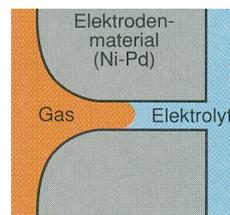
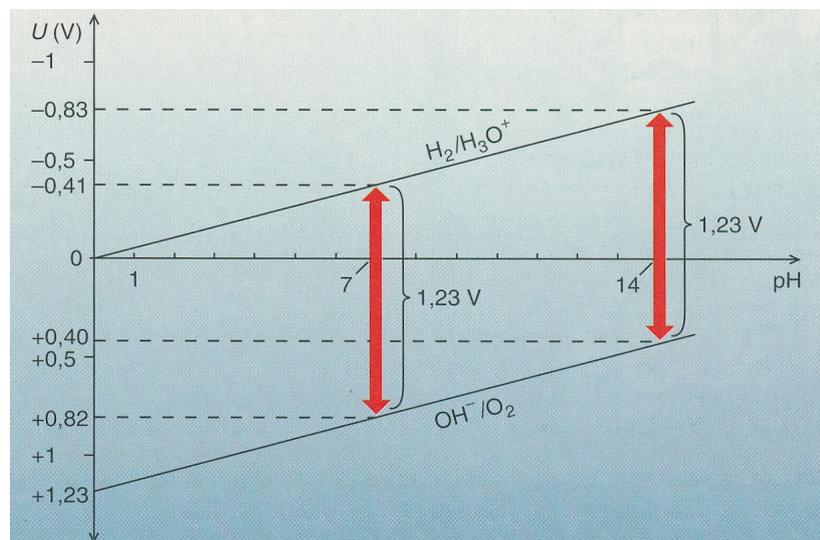


Abb. 27: Dreiphasengrenze

Die Zellenspannung ergibt sich als Differenz der Elektrodenpotentiale beider Halbzellen.

Die **Spannung** ist unabhängig von der Konzentration der  $\text{OH}^{-}$ -Ionen und daher auch **unabhängig vom pH-Wert** der Lösung, da die Potentiale der beiden Halbzellen in gleicher Weise vom pH-Wert abhängen (Abb.28).

Abb.28: pH-Abhängigkeit der Zellspannung



## 6 Elektrolysen

Betrachtet man die bisherigen chemischen Reaktionstypen, wie sie sich bei **Stromzufuhr** verhalten, spricht man von **Elektrolysen**.

### 6.1 Elektrolyte

Alle elektrochemischen Prozesse laufen unter Beteiligung von Ionen ab. Diese Ionen sind in festen, salzartigen Stoffen bereits vorhanden. Sie bilden dort ein sehr stabiles Ionengitter. In diesem ortsfesten Zustand sind sie allerdings nicht in der Lage, Ladungen zu transportieren. Erst wenn die Gitterenergie überwunden wird und die Ionen voneinander getrennt und frei beweglich werden, ist eine Beteiligung an der Stromleitung möglich.

Die Auftrennung in frei bewegliche Ionen kann durch **Schmelzen** oder durch **Lösen** in Wasser erfolgen. Beim Lösungsvorgang wird die Gitterenergie durch die bei der Hydratation der Ionen freiwerdende Hydrationsenergie überwunden.

Neben Ionenverbindungen sind auch eine Reihe wässriger Lösungen von Molekülverbindungen in der Lage, Strom zu leiten, da diese bei der Reaktion mit Wasser hydratisierte Ionen bilden. Beispiele für solche Elektrolyte sind die Säuren.

Allgemein bezeichnet man Stoffe, deren Schmelzen und wässrige Lösungen den Strom leiten, als **Elektrolyte**.

### 6.2 Redoxvorgänge bei der Elektrolyse

**Elektrolysen** sind Vorgänge, bei denen durch den elektrischen Strom stoffliche Veränderungen des Elektrolyten erzwungen werden.

#### Elektrolyse von Kupferchlorid

##### Lehrerversuch:

Versuchsaufbau:

Beobachtungen:

Redoxpaare:



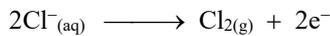
### Elektrolyse von Zinkchlorid

Bei der Elektrolyse einer wässrigen Zinkchlorid-Lösung (Abb.29) entsteht an der Kathode Zink und an der Anode entwickelt sich Chlor. Die hydratisierten Ionen werden also jeweils an der entgegengesetzt geladenen Elektrode entladen:

Kathode (-): (Reduktion)



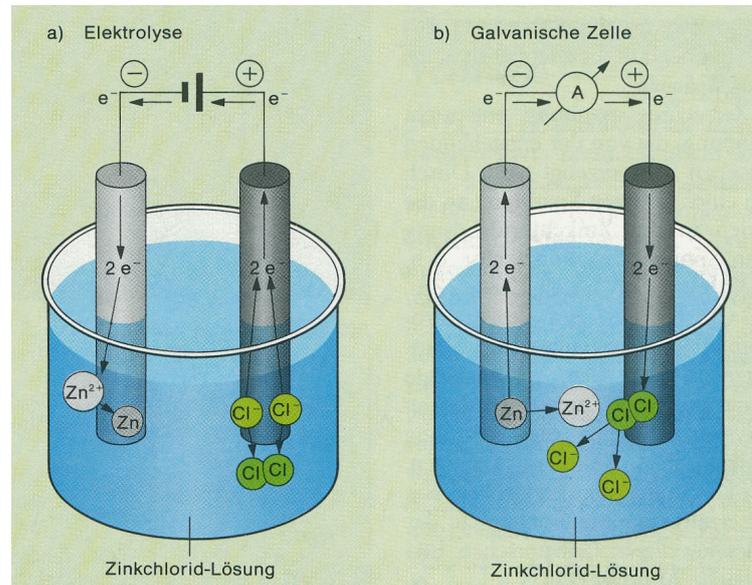
Anode (+): (Oxidation)



Diese Elektrodenvorgänge laufen nur unter dem Zwang einer ausreichend großen Gleichspannung ab. Es handelt sich um erzwungene, **endergonische Redoxreaktionen**.

Die Zink-Ionen nehmen von der Kathode Elektronen auf und werden zu Zink reduziert, die Chlorid-Ionen geben an die Anode Elektronen ab, d.h. sie werden zum Chlor oxidiert.

Abb.29: Vergleich zwischen Elektrolyse und Galvanischer Zelle

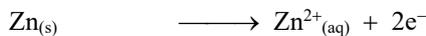


Ganz allgemein kann man sagen:

Bei einer Elektrolyse laufen eine **kathodische Reduktion** und eine **anodische Oxidation** ab.

Wird die angelegte Spannung abgeschaltet, so zeigt das Voltmeter trotzdem für einige Zeit noch eine Spannung von ca. 2,1 V an, wobei die Stromrichtung jetzt dem ursprünglichen Elektrolysenstrom entgegengerichtet ist: Die Elektroden sind aufgrund der Elektrolyse **polarisiert** worden und zu einer Zink- und einer Chlorelektrode geworden. Es ist eine Galvanische Zelle entstanden:

Anode (-): (Oxidation)



Kathode (+): (Reduktion)



Die durch die Elektrolyse gebildeten Elemente Zink und Chlor gehen hierbei freiwillig unter Abgabe bzw. Aufnahme von Elektronen in ihre oxidierte bzw. reduzierte Form über. Diese Vorgänge liefern Energie (elektrische Energie), d.h. die Reaktion ist **exergonisch**.

Die Elektrolyse ist eine erzwungene Umkehrung der freiwillig ablaufenden Reaktion einer Galvanischen Zelle.

### 6.3 Zersetzungsspannung

Die Spannung, bei der die Zersetzung des Elektrolyten beginnt, bezeichnet man als **Zersetzungsspannung**.

Die Zersetzungsspannung entspricht der Spannung, die von der entstehenden Galvanischen Zelle erzeugt wird, d.h. sie entspricht der **EMK** des jeweiligen Galvanischen Elementes (siehe Abb.30).

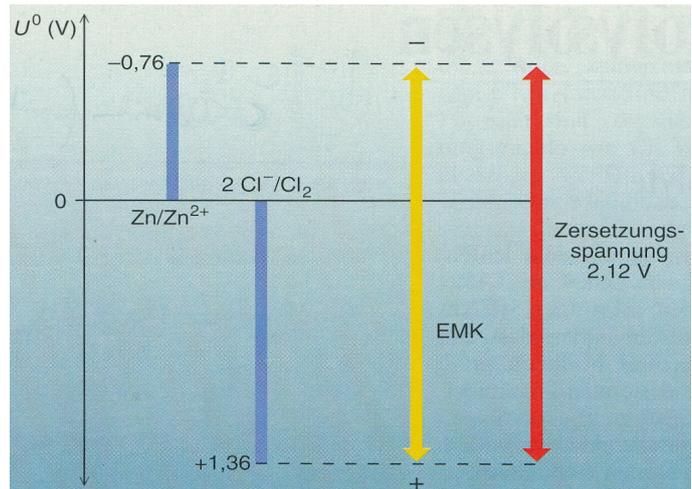


Abb.30: Vergleich von Zersetzungsspannung und EMK

### 6.4 Überspannung

#### Aufgabe:

Betrachte nachfolgende Redoxpaare, die bei der Elektrolyse einer Zinkchlorid-Lösung vorliegen:  
 $Zn/Zn^{2+}$      $2Cl^-/Cl_2$      $OH^-/O_2$  (pH = 7)     $H_2/H_3O^+$  (pH = 7)

Welche Zersetzungsspannung wird benötigt?

#### Lösung:

Unter Betrachtung der Standardpotentiale ist es überraschend, daß sich bei der Elektrolyse einer wässrigen Zinkchlorid-Lösung überhaupt Zink und Chlor abscheiden. Nach der Spannungsreihe sollten sich bereits bei einer viel geringeren Spannung Wasserstoff und Sauerstoff entwickeln:

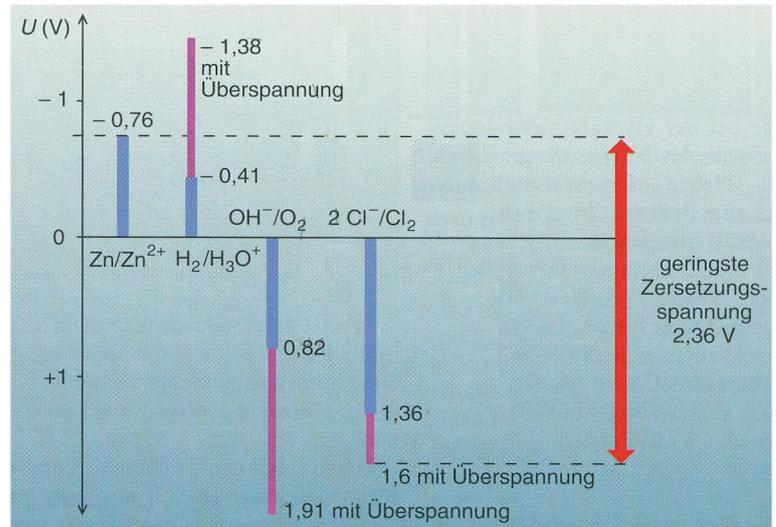
Bei pH=7 beträgt die Zersetzungsspannung für Wasser 1,23 V. In der Praxis entstehen Wasserstoff und Sauerstoff jedoch erst bei deutlich höheren Spannungen.

Diese Erscheinung ist auch bei vielen anderen Stoffabscheidungen durch Elektrolyse zu beobachten, man nennt sie **Überspannung**. Sie tritt insbesondere bei der **Abscheidung von Gasen** auf. Die Höhe der Überspannung bei einem Stoff ist von verschiedenen Faktoren abhängig, u. a. vom **Material der Elektroden**, deren **Oberflächenbeschaffenheit** und der **Stromdichte**.

Aufgrund der Überspannung (vgl. Abb.31) werden bei der Elektrolyse von Zinkchlorid-Lösung mit Kohleelektroden Zink und Chlor abgeschieden.

Ein Vergleich der Redoxpotentiale und der Überspannungen ermöglicht es abzuschätzen, welche Stoffe bei Elektrolysen von wässrigen Lösungen abgeschieden werden.

Abb.31: Spannungsverhältnisse bei der Elektrolyse einer Zinkchlorid-Lösung mit Graphitelektroden (bei  $0,1 \text{ A/cm}^2$ )



Allgemein lässt sich folgende Regel formulieren: Es laufen immer diejenigen Prozesse ab, für die die Zersetzungsspannung am geringsten ist:

Die **Zersetzungsspannung** errechnet sich aus der Differenz der um die Überspannungen erhöhten Redoxpotentiale.

## 6.5 Elektrolysen in wässrigen Lösungen

Bei vielen Elektrolysen von wässrigen Salzlösungen entstehen an der Kathode Wasserstoff und an der Anode Sauerstoff. Dass z.B. bei der Elektrolyse von Natriumsulfat-Lösung weder die  $\text{Na}^+$ -Ionen reduziert noch die  $\text{SO}_4^{2-}$ -Ionen oxidiert werden, ergibt der Vergleich der Redoxpotentiale:

Die Zersetzungsspannungen betragen (ohne Berücksichtigung der Überspannung):

Zersetzung von Wasser:

$$U_0$$

$$U_0$$

$$U_0(\text{Na}/\text{Na}^+) =$$

$$U_0(2\text{SO}_4^{2-}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}) =$$

$$U_z(\text{Wasser}) =$$

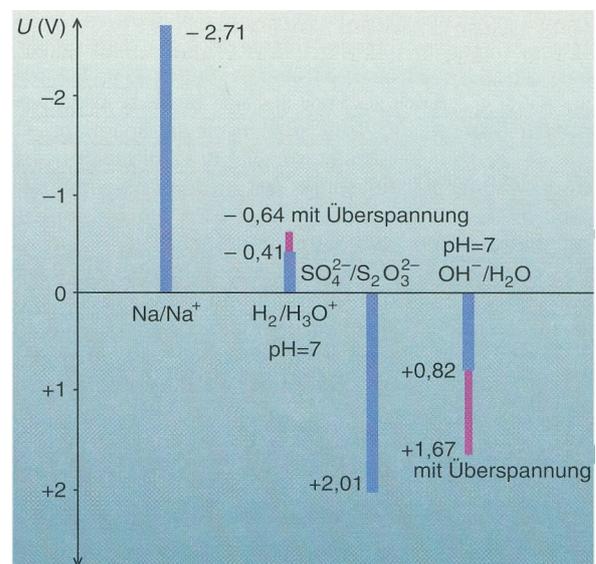
$$U_z(\text{Na}_2\text{SO}_4) =$$

Berücksichtigt man die Überspannungen (Abb.32) erhält man folgende Zersetzungsspannungen:

$$U_z(\text{Wasser}) =$$

$$U_z(\text{Na}_2\text{SO}_4) =$$

Abb.32: Spannungsverhältnisse bei der Elektrolyse einer wässrigen Natriumsulfat-Lösung an Platinelektroden (bei  $10^{-2} \text{ A/cm}^2$ )



Auch unter Einbeziehung der Überspannung von Sauerstoff und Wasserstoff an Platin-Elektroden und bei geringen Stromdichten bleibt die Zersetzungsspannung von Wasser kleiner als die von Natriumsulfat.

Entsprechendes gilt für andere Elektrolysen wässriger Lösungen. Z.B. werden bei einer Kaliumnitrat-Lösung (unabhängig vom Elektrodenmaterial) Wasserstoff und Sauerstoff abgeschieden und aus einer Natriumchlorid-Lösung entwickeln sich an Kohlelektroden Wasserstoff und Chlor.

## 6.6 Technisch wichtige Elektrolysen

Bei technischen Anwendungen kann man wie folgt unterscheiden:

- **Metallgewinnung:** die Gewinnung von Metallen aus Erzen erfolgt meist zunächst durch die Herstellung einer Salzlösung, aus der das Metall dann elektrolytisch getrennt wird. Liegt das Metall in der Natur mit anderen Metallen vor oder wurde es durch andere Verfahren nicht rein genug gewonnen, so erfolgt dies elektrolytisch.  
Beispiele: Kalium, Calcium, Magnesium, Kupfer, Aluminium
- **Gewinnung eines Nichtmetalls:** auch die Gewinnung von Nichtmetallen kann elektrolytisch erfolgen. Beispiel: Chlorgewinnung.
- **Metallüberzüge:** Die elektrolytische Metallabscheidung<sup>1)</sup> dient dazu, die Oberflächen von unedleren Metallen mit einer dünnen Metallschicht zu überziehen.  
Beispiele: verzinktes Stahlblech, verchromter Fahrradlenker, verzinnte Konservendose, versilbertes Besteck.



Abb.33: Elektrolyse

Nachfolgend werden einige wichtige Elektrolysen vorgestellt.

### 6.6.1 Elektrolytische Raffination von Kupfer

Durch die Verhüttung von Kupfererzen gewinnt man **Rohkupfer**, das ca. 94 – 98% Kupfer enthält. Die Verunreinigungen, überwiegend bestehend aus Eisen, Zink, Blei, Silber, Gold und Platin, stammen ebenfalls aus den Erzen. Zur Reinigung des Rohkupfers wird dieses zunächst einer **Raffinationsschmelze** unterworfen, bei der durch Zusatz bestimmter Zuschläge ein Teil der Verunreinigungen in Form von Schlacken oder flüchtigen Verbindungen abgetrennt wird. Das so gewonnene **Garkupfer** besitzt einen Reinheitsgrad von bis zu 99%.

Für eine Reihe von Produktionsbereichen, z.B. für die Elektroindustrie, reicht diese Reinheit nicht aus. Durch **elektrolytische Raffination** (Abb.34) erreicht man einen höheren Grad. Hierzu gießt man aus Garkupfer Elektrodenplatten, die in angesäuerte Kupfersulfat-Lösung gehängt werden. Die Garkupferplatten werden als Anode verwendet, als Kathoden dienen dünne Bleche aus Reinkupfer.

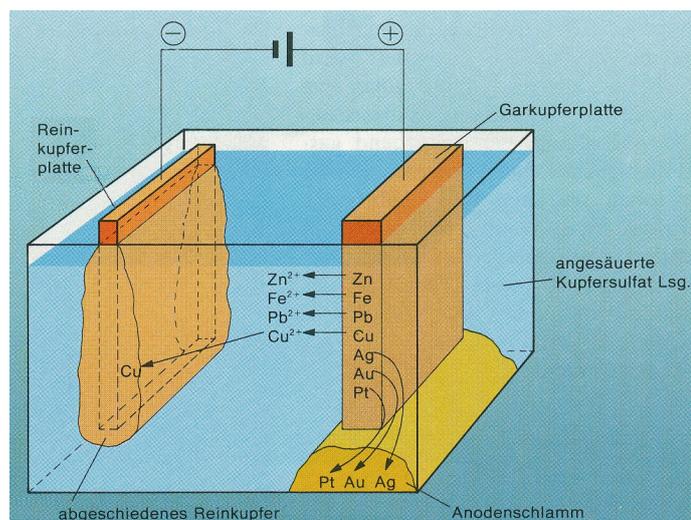


Abb.34: Elektrolytische Raffination von Kupfer

<sup>1)</sup> 1842 gelang es Werner VON SIEMENS (1816 - 1892), einen Silberlöffel durch Gleichstrom mit einer Goldschicht zu überziehen

An der **Anode** werden die Stoffe mit kleinsten Redoxpotentialen oxidiert (z.B. Zink, Eisen). Die Spannung wird so gewählt, dass auch das Kupfer oxidiert wird. Die Garkupferanode löst sich somit auf. Die Verunreinigungen aus edleren Metallen fallen als **Anodenschlamm** zu Boden. Durch weitere Aufbereitung werden daraus größere Mengen an Silber, Gold und Platin gewonnen.

An der **Kathode** werden die Kationen mit dem größten Redoxpotential reduziert: es scheidet sich **Reinkupfer** (Reinheitsgrad 99,9%) ab.

### 6.6.2 Chloralkalielektrolyse

Die Chloralkalielektrolyse ist eine bedeutende Methode zur Herstellung von Chlor und Natronlauge bzw. anderen Alkalilaugen. Die Elektrolyse ist eines der bedeutendsten großtechnischen Verfahren. So werden beispielsweise in Deutschland jährlich über 3 Mio. Tonnen Chlor zur Herstellung von weiteren Stoffen (Organische Produkte, Polymere, Lösemittel u.a.) gewonnen.

Es gibt mehrere Verfahren, bei denen grundsätzlich zunächst eine aus Steinsalz (hoher Natriumchlorid-Anteil) gewonnene konzentrierte **Natriumchlorid-Lösung** hergestellt wird.

Das bekannteste Verfahren ist das **Quecksilber-Verfahren** (Amalgam-Verfahren) (Abb.35).

Man arbeitet mit einer **Quecksilberkathode**: das Quecksilber fließt ständig als breites Band über den Boden der Elektrolysezelle. Am Quecksilber scheidet sich Natrium ab, das sich mit dem Quecksilber zu einer Legierung, Natriumamalgam, umsetzt.

An der **Anode** werden Chlorid-Ionen entladen, wobei sich elementares **Chlor** bildet.

Das Natriumamalgam wird in eine zweite Wanne geleitet, in der das Amalgam mit **Wasser** umgesetzt wird: Bildung von **Wasserstoff** und 20 bis 50%iger **Natronlauge**.

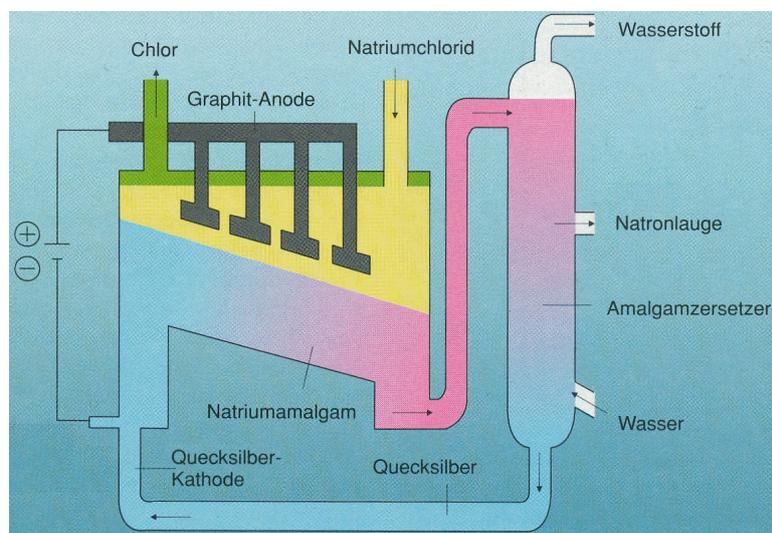


Abb.35: Chloralkalielektrolyse nach dem Quecksilberverfahren.

#### Aufgabe:

Betrachte nachfolgende Redoxpaare, die bei der Elektrolyse nach dem Quecksilber-Verfahren vorliegen:



Welche Reaktionen finden statt?

#### Lösung:

Betrachten wir die Spannungsverhältnisse bei der Elektrolyse (Abb.37):

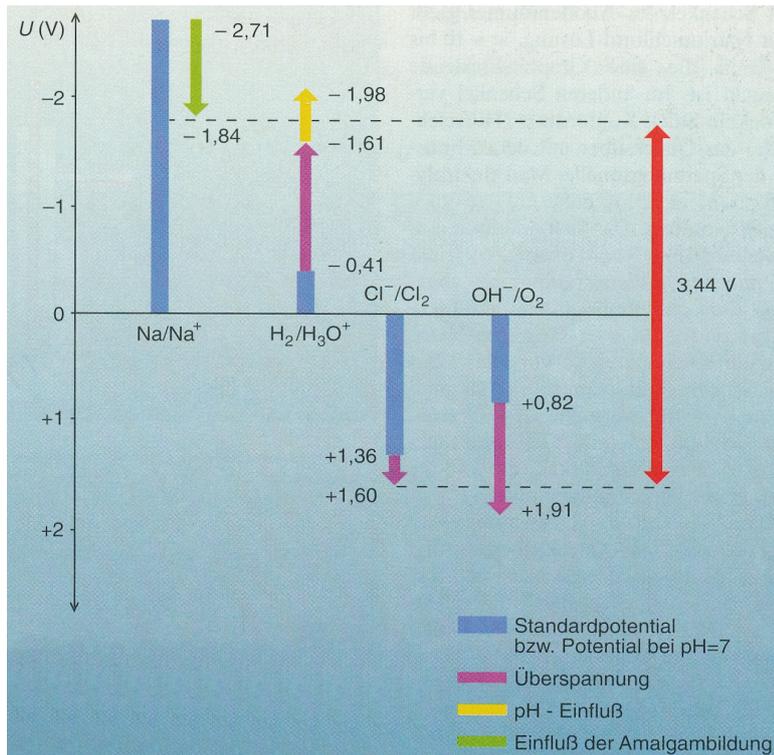


Abb.36: Spannungsverhältnisse bei der Elektrolyse einer Natriumchlorid-Lösung ( $c = 1 \text{ mol/l}$ ) nach dem Amalgam-Verfahren bei einer Stromdichte von  $0,1 \text{ A/cm}^2$

Aufgrund der Stellung in der Spannungsreihe wäre zu erwarten, dass an der Kathode Wasserstoff und nicht Natrium abgeschieden wird. Dies wird durch mehrere Faktoren verhindert:

- die hohe Überspannung des Wasserstoffs an Quecksilber führt zu einer Erniedrigung des Redoxpotentials von Wasserstoff
- der Zusatz von Natriumhydroxid und Natriumcarbonat führt zu einer Erhöhung des pH-Wertes, wodurch das Redoxpotential des Wasserstoffes noch niedriger wird
- die Natriumamalgambildung führt zu einer Erhöhung des Redoxpotentials von Natrium (von  $-2,71 \text{ V}$  auf  $-1,84 \text{ V}$ ).

Die Folge ist, dass sich Natrium leichter abscheidet als Wasserstoff.

### 6.6.3 Schmelzflußelektrolysen

#### Elektrolyse von Bleichlorid

##### Film:

Versuchsaufbau:

Beobachtungen:

Redoxpaare:

### Elektrolyse von Natriumchlorid

Natriumchlorid dient auch als Ausgangsprodukt zur Herstellung von Natrium durch die **Schmelzflußelektrolyse**. Aus geschmolzenem Natriumchlorid entsteht dabei Natrium und Chlor.

Die Anlage (Abb.37) ist so gebaut, dass die abgeschiedenen Elemente nicht wieder zusammentreffen und erneut reagieren können:

Das an der Kathode entstehende Natrium steigt infolge seiner geringen Dichte in der Natriumchlorid-Schmelze nach oben in eine Rinne und von dort in ein Sammelgefäß.

Das anodisch entstehende Chlor wird durch einen Trichter vom Natrium abgelenkt.

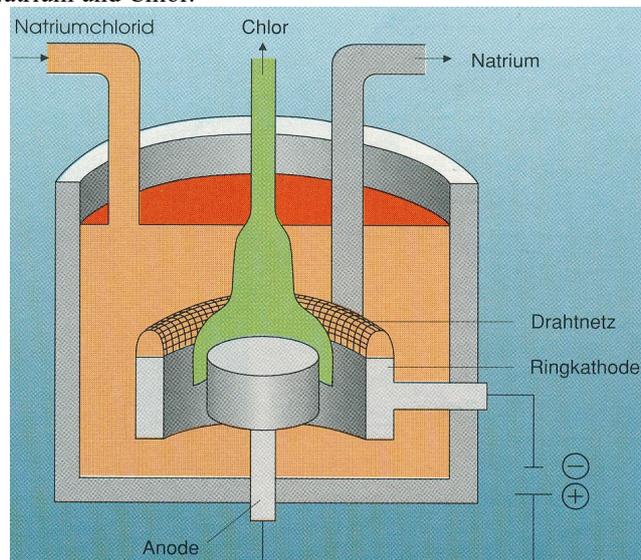


Abb.37: Schmelzflußelektrolyse von Natriumchlorid

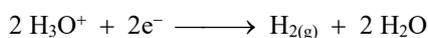
### 6.6.4 Eloxal-Verfahren

Aluminium ist aufgrund seiner geringen Dichte und hohen Zähigkeit ein wichtiger Werkstoff. Entsprechend seiner Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe ist er jedoch sehr reaktionsfähig. Bereits an der Luft überzieht es sich mit einer so dichten Oxidschicht (3 µm dick), dass es vor einer weiteren Oxidation geschützt ist (**Passivierung**).

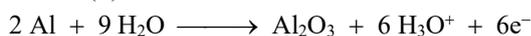
Zur Verwendung von Aluminium als Werkstoff kann diese Schicht durch ein elektrochemisches Verfahren verstärkt werden: die **elektrochemische Oxidation** von Aluminium, das **Eloxal-Verfahren**.

Beim Eloxal-Verfahren (Abb.38) stellt das Werkstück die **Anode** dar und wird in einer Säure der Elektrolyse unterworfen.

Kathode (-):



Anode (+):



Während sich an der Aluminium-Kathode Wasserstoff abscheidet, wird die Aluminium-Anode (das Werkstück) an der Oberfläche oxidiert. Die Dicke der Oxidschicht kann so bis auf das Zehnfache (0,03 mm) erhöht werden.

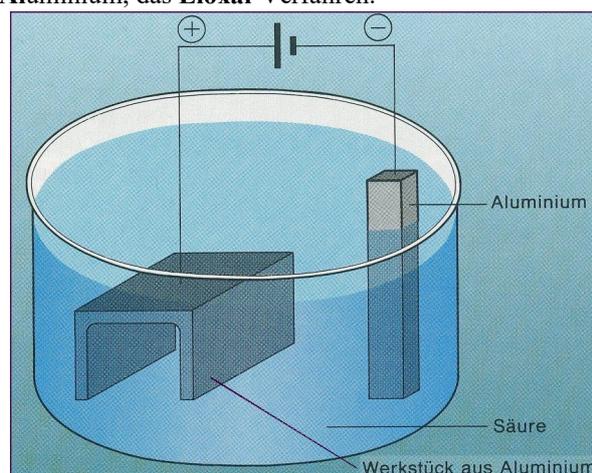


Abb.38: Eloxal-Verfahren

Da sich die Oxidschicht leicht einfärben lässt, können gleich farbige Aluminiumteile hergestellt werden. Beispiele: Fensterrahmen, Kleinteile am Fahrrad.



# V Chemie

## B Der Atombau

### 1 Energiestufen in der Elektronenhülle

#### 1.1 Kern und Elektronenhülle

##### 1.1.1 Kern-Hülle-Modell

Rutherford<sup>1)</sup> bestrahlte dünne Metallfolien mit  $\alpha$ -Strahlen. Diese durchdrangen fast alle ungehindert die Folie, nur ein sehr geringer Anteil wurde deutlich abgelenkt. Da die Strahlen aus positiv geladenen Teilchen bestanden, schloß Rutherford aus den Versuchsergebnissen, daß die gesamte positive Ladung und fast die gesamte Masse eines Atoms in einem winzigen Bereich im Zentrum des Atoms vereinigt sind, dem **Atomkern**. Die positive Ladung des Atomkerns wird durch die negativ geladenen Elektronen ausgeglichen, die sich in der **Elektronenhülle** bewegen, einem kugelförmigen Raum, der den Atomkern umgibt.

##### 1.1.2 Atomkern

Der Kern besteht aus positiv geladenen **Protonen** und ungeladenen **Neutronen**. Diese Kernbausteine bezeichnet man zusammenfassend als **Nukleonen**. Die Masse eines Protons und eines Neutons beträgt jeweils ungefähr 1 u.

Wegen der geringen Masse der Elektronen ist die Masse des Atomkerns nahezu identisch mit der Masse des gesamten Atoms.

##### 1.1.3 Elektronenhülle

Für den Chemiker sind Kenntnisse über den Aufbau der Elektronenhülle besonders interessant, da ein Zusammenhang besteht zwischen stofflichen Veränderungen bei chemischen Reaktionen und Veränderungen in der Elektronenhülle.

##### 1.1.4 Energie der Elektronen

Da sich ein Elektron in der Hülle im Anziehungsbereich des Kerns bewegt, besitzt es sowohl **Bewegungsenergie** (kinetische Energie) als auch **Lageenergie** (potentielle Energie).

Die Lageenergie und somit die Gesamtenergie sind umso höher, je weiter das Elektron im Mittel vom Kern entfernt ist.

##### 1.1.5 Ionisierungsenergie

Wird einem Atom Energie zugeführt, kann ein Elektron diese Energie aufnehmen. Dabei vergrößert sich der mittlere Abstand des Elektrons vom Kern. Übersteigt die Energiezufuhr einen bestimmten Wert, verläßt das Elektron den Anziehungsbereich des Kerns, und es entsteht ein positiv geladenes Ion.

Die Energie die gerade ausreicht, um ein Elektron aus einem Atom oder aus einem bereits vorliegenden Ion abzuspalten, bezeichnet man als **Ionisierungsenergie**.

---

Hinweis zum Kapitel „Der Atombau“:

Auszüge aus elemente Chemie II  
Klett  
ISBN 3-12-759800-9  
und ISBN 3-12-756700-6

---

<sup>1)</sup> Ernest, lord RUTHERFORD of Nelson (1871-1937):  
neuseeländischer Physiker, Nobelpreis in Chemie 1908



## 1.2 Linienspektren und Atomhülle

Genauere Aufschlüsse über Energien in der Elektronenhülle liefert die Auswertung von Atomspektren. Solche Spektren erhält man, wenn man einem Stoff und damit seinen Atomen Energie zuführt. Dies soll am Beispiel des Wasserstoffs genauer beschrieben werden.

### 1.2.1 Kontinuierliches Spektrum

Schickt man den von einer Glühlampe erzeugten Lichtstrahl durch ein Glasprisma oder ein feines Liniengitter, so wird das weiße Licht in seine Farbkomponenten zerlegt. Auf einem Schirm erhält man eine Abfolge von Farben von rot bis violett, die kontinuierlich ineinander übergehen. Man spricht von einem **kontinuierlichen Spektrum** (Abb.1).

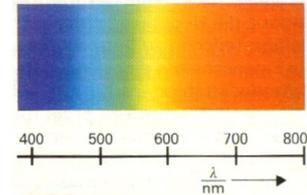


Abb.1: Kontinuierliches Spektrum

Betrachtet man Licht als elektromagnetische Welle, so entsprechen die verschiedenen Farben unterschiedlichen Wellenlängen. Das sichtbare Licht von violett bis rot entspricht den Wellenlängen von etwa 380 nm bis 780 nm.

Außer durch die Wellenlänge  $\lambda$  d. h. die Strecke zwischen Wellenberg und dem nächsten Wellenberg, ist eine Welle durch ihre Frequenz  $f$  charakterisiert. Sie gibt die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde an.

Frequenz und Wellenlänge sind miteinander verknüpft:

Zusammenhang zwischen der **Frequenz** und der **Wellenlänge** von **Lichtwellen**.

$$f \cdot \lambda = c$$

$f$ : Frequenz in Hz = 1/s

$\lambda$ : Wellenlänge in m

$c$ : Lichtgeschwindigkeit in m/s

$c = 299\,792\,458$  m/s (im Vakuum)

$c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s

Eine Welle mit großer Wellenlänge besitzt demnach eine kleine Frequenz.

Licht unterschiedlicher Frequenz unterscheidet sich auch in seiner Energie. Diese ist zur Frequenz proportional. Es gilt die Beziehung:

**Energie** von **Lichtwellen**

$$E = h \cdot f$$

$E$ : Energie in J

$h$ : Planck-Konstante<sup>1)</sup>

$h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$  Js

$f$ : Frequenz in Hz = 1/s

### 1.2.2 Linienspektrum

Wird an eine mit Wasserstoff gefüllte Spezialröhre Hochspannung angelegt, so leuchtet das Gas auf. Zerlegt man dieses Licht mit einem Prisma bzw. einem Gitter, erhält man statt eines kontinuierlichen Spektrums eine Reihe farbiger Linien, ein **Linienspektrum** (Abb.2).

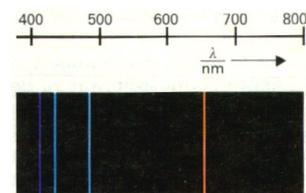


Abb.2: Linienspektrum

Diese Lichtemission läßt sich verstehen, wenn man annimmt, daß das Elektron im Wasserstoffatom zugeführte Energie aufnehmen kann, also energiereicher wird. Es kann diese Energie jedoch nicht behalten und gibt sie sofort wieder in Form von Licht bestimmter Frequenz ab.

Das Auftreten von diskreten Linien im Spektrum zeigt, daß das Elektron nur bestimmte Energiebeträge aufnehmen und wieder abgeben kann. Dies bedeutet, daß das Elektron von seinem Zustand vor der Energiezufuhr (Grundzustand) aus nur bestimmte Zustände höherer Energie annehmen kann. Solch einen Zustand bestimmter Energie bezeichnet man als **Energieniveau**.

<sup>1)</sup> Max PLANCK (1858-1947): deutscher Physiker, Entdecker der Proportionalitätskonstanten  $h$ , Quantentheorie, Nobelpreis 1918



Jede Spektrallinie entspricht dem Übergang von einem höheren auf ein tieferes Energieniveau.



Mit geeigneten Apparaturen läßt sich erkennen, daß Wasserstoff ein Spektrum liefert, das auch Linien außerhalb des sichtbaren Bereichs besitzt. (Abb.3)

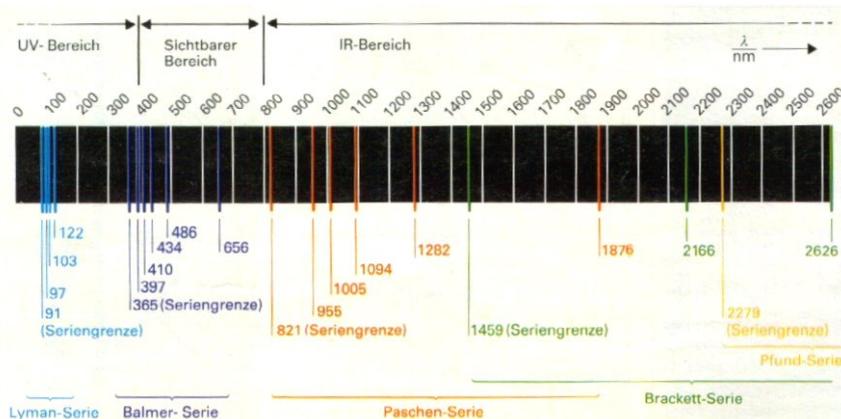


Abb.3: Linienspektrum des Wasserstoffatoms unter Hinzunahme nicht sichtbarer Bereiche

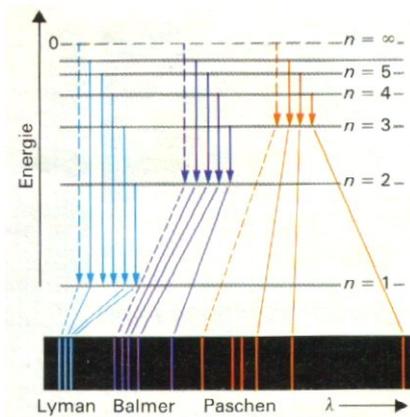
Eine Auswertung des vollständigen Spektrums ergibt ein Energieniveauschema, das zeigt, welche Niveaus das Elektron im Wasserstoffatom einnehmen kann (Abb.4).

Die einzelnen Niveaus werden mit  $n = 1$ ,  $n = 2$  usw. bezeichnet.

Beim Übergang eines Elektrons von höheren Niveaus auf das Niveau  $n = 1$  entsteht eine Serie von Linien, die Lyman-Serie. Entsprechende Serien gibt es auch für Übergänge auf  $n = 2$  usw., die nach ihren jeweiligen Entdeckern benannt sind.

Jede Serie hat unendlich viele Linien, die sich bis zur Seriegrenze verdichten. Die obere Grenze der Energieniveaus entspricht der Ionisierungsgrenze, oberhalb der das Elektron das Atom verläßt.

Abb.4: Deutung des Spektrums



## 2 Die Wellennatur der Elektronen

### 2.1 Welle-Teilchen-Dualismus

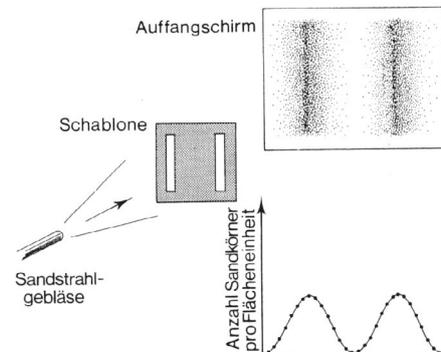
#### 2.1.1 Doppelspaltversuche mit Sandkörnern

Mit einem Sandstrahlgebläse wird ein Strahl aus **Sandkörnern** gegen eine Schablone gerichtet (Abb.1). In der Schablone sind zwei Spalte ausgespart, deren Breite klein gegenüber ihrem gegenseitigen Abstand ist. Hinter der Schablone bleiben die durch die Spalten fliegenden Sandkörner an einer präparierten Wand haften.

Nach und nach entwickelt sich auf der Wand ein Abbild der Schablone: zwei Regionen, in denen sich gerade hinter den beiden Spalten auf der Wand besonders viele Sandkörner angesammelt haben.

Zählt man entlang einer Geraden quer zu den Spalten die Anzahl Sandkörner, die pro Flächeneinheit auf die Wand geprallt sind, und verbindet die Punkte in einem Diagramm, so erhält man eine Verteilungskurve. Dort wo diese Kurve ihre Höchstwerte besitzt, sind besonders viele Sandkörner auf die Wand getroffen.

Abb.1: Doppelspaltversuch mit Sandstrahlgebläse und Verteilungskurve. Spaltabstand groß

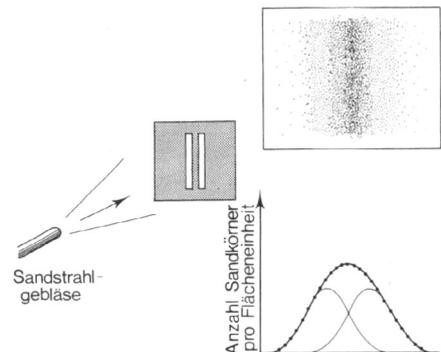


Der Versuch wird mit einer anderen Schablone wiederholt, deren Abstand der beiden Spalten klein gegenüber deren Breite ist (Abb.2).

Das Ergebnis überrascht nicht: die beiden Sandbilder verschwimmen ineinander.

Die Verteilungskurve hat mittig ein Maximum. In das Diagramm sind die beiden Verteilungskurven eingezeichnet, die man bekommen würde wenn man jeweils einen der Spalten zuhalten würde. Die erhaltene Verteilungskurve ist einfach die Summe der beiden getrennten Verteilungskurven.

Abb.2: Doppelspaltversuch mit Sandstrahlgebläse und Verteilungskurve. Spaltabstand klein



#### 2.1.2 Doppelspaltversuche mit Elektronen

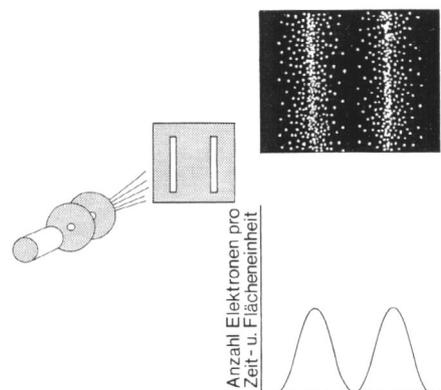
Das gleiche Experiment wird mit **Elektronen** durchgeführt. In einer Elektronenkanone werden Glühelektronen mit einer Spannung von 50000 Volt beschleunigt. Der aus der Lochanode austretende Elektronenstrahl wird durch elektromagnetische Linsensysteme gebündelt und trifft auf eine Kupferfolie. In ihr sind zwei feine Spalten ausgespart, die eine Breite von nur  $3 \cdot 10^{-8}$  m besitzen. Das elektronische Abbild dieser Spalten entsteht, wie beispielsweise in einem Elektronenmikroskop, auf einem Fluoreszenzschirm. (Abb.3).

Auf diesem Schirm lassen sich deutlich die beiden Spalten unterscheiden: zwei helle Streifen, an denen also besonders viele Elektronen auftreffen und den Schirm zum Leuchten bringen, und dazwischen eine dunkle Region, wo keine Elektronen eintreffen.

Würde man mit einem feinen Elektronendetektor, einem Geigerzähler oder einem Elektronenvervielfacher, den Leuchtschirm abtasten und die Zahl der Elektronen ermitteln, die pro Zeiteinheit auf jedes Flächenelement des Schirms prasseln, so erhielte man eine Verteilungskurve mit zwei Maxima.

Die Ergebnisse sind also vergleichbar mit dem Experiment mit den Sandkörnern.

Abb.3: Doppelspaltversuch mit Elektronen und Verteilungskurve. Spaltabstand groß



Der Versuch wird mit einer anderen Schablone wiederholt, in der die beiden Spalten sehr dicht nebeneinander

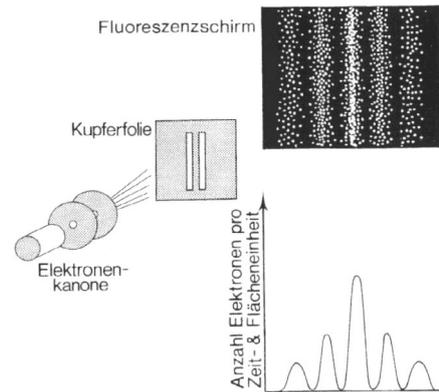
stehen (Abb.4).

Das Ergebnis ist verblüffend. Auf dem Bildschirm entsteht ein Muster aus mehreren abwechselnd hellen und dunklen Streifen.

Auch die Häufigkeitsverteilung der Elektronen zeigt einen Verlauf mit mehreren Maxima, jeweils getrennt durch ein Minimum.

Das entstandene Muster ist ein charakteristisches Interferenzmuster. Dieser Effekt lässt sich nur erklären, wenn die Elektronen sich wie Wellen verhalten. Ähnlich wie beispielsweise kreisförmige Wasserwellen überlagern sich die beiden Wellen. Hierdurch kommt es zu Bereichen mit Auslöschung und Bereichen mit Verstärkung.

Abb.4: Doppelspaltversuch mit Elektronen und Verteilungskurve. Spaltabstand klein



Im Jahre 1924 stellte Louis DE BROGLIE <sup>1)</sup> die Hypothese auf, ein Elektron sei nicht nur als kleines Teilchen zu betrachten, sondern es besitze auch die Eigenschaften einer Welle.

Er beschrieb den Zusammenhang zwischen der Elektronengeschwindigkeit und ihrer Wellenlänge mit der benannten Gleichung, die für alle bewegten Teilchen gilt:

#### De-Broglie-Beziehung

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$\lambda$ : Wellenlänge in m

$h$ : Planck-Konstante

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$m$ : Masse eines Teilchens in kg

$v$ : Geschwindigkeit eines Teilchens in m/s

Mit der Beziehung kann jedem bewegten Teilchen eine Wellenlänge zugeordnet werden, nachweisbar ist die Welleneigenschaft jedoch nur für Teilchen sehr kleiner Masse, z.B. für Elementarteilchen.

Dieses Problem, ein bewegtes Teilchen auch als Welle darstellen zu müssen, war zu Beginn des 20. Jahrhunderts bereits bei der Erklärung der Natur des Lichts aufgetreten. Es zeigte sich, dass ein Lichtstrahl, dessen Verhalten als Welle bereits bewiesen war, sich auch wie ein Strahl aus schnell fliegenden Teilchen (Korpuskeln), den Photonen, verhielt.

#### Welle-Teilchen-Dualismus:

Die unterschiedlichen Beschreibungen von Licht und Elektronen hoher Geschwindigkeit als Wellen oder Teilchen sind zwei unterschiedliche Modellbetrachtungen.

Es ist zweckmäßig, je nach beobachtbarer Eigenschaft jeweils das eine oder das andere Modell heranzuziehen, das eine sinnvolle Deutung zulässt.

## 2.2 Stehende Wellen

Zur Erklärung vieler Eigenschaften der Atome hat es sich als notwendig erwiesen, auch das Elektron im Atom als Welle zu beschreiben. Da das Elektron aufgrund der Anziehung durch den Kern das Atom ohne Energiezufuhr nicht verlässt, muss es sich um stehende Wellen handeln.

In dem dreidimensionalen Raum des Atoms bilden die Elektronen dreidimensionale stehende Wellen. Zur Vereinfachung kann man sich das Elektron im Atom zunächst als eine eindimensionale stehende Welle vorstellen, die sich zwischen zwei undurchdringlichen Wänden ausbildet.

Zwischen diesen Wänden mit Abstand  $l$  kann das Elektron nur bestimmte Wellenlängen ausbilden. In Abb.5 ist beispielsweise die größtmögliche Wellenlänge eingezeichnet.

Für die Wellenlänge gilt die bekannte Beziehung:

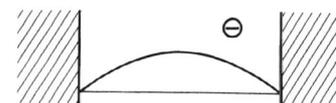


Abb.5: Elektron als Welle zwischen zwei Wänden

<sup>1)</sup> Louis DE BROGLIE (1892-1987): französischer Physiker, Nobelpreis 1929



## Wie verändert sich die Energie des Elektrons in Abhängigkeit von der Anzahl an Wellenknoten?

Überlegung:

- Anzahl der Wellenknoten
- ⇒ Wellenlänge
- ⇒ Geschwindigkeit
- ⇒ Kinetische Energie
- ⇒ Energieänderung

Mit **steigender Anzahl an Wellenknoten** steigt also auch das **Energieniveau** des Elektrons. In Abb.6. ist das Elektron als zwei Wellen von unterschiedlichem Energieniveau dargestellt.

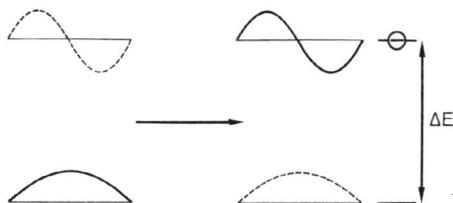


Abb.6: Energieniveaus der Wellen eines Elektrons

Des Weiteren erkennt man, dass das Elektron **nur ganz bestimmte Energiezustände** einnehmen kann, man sagt die Energie ist **quantelt**. Sie kann sich nicht kontinuierlich ändern, sondern nur in Portionen (Quanten).

Die unterschiedlichen Energieniveaus und Schwingungszustände werden durch die sogenannte **Quantenzahl n** gekennzeichnet.

In Abb.7 ist der Zusammenhang zwischen Energie, Quantenzahl und Anzahl der Wellenknoten für die eindimensionale stehende Welle veranschaulicht.

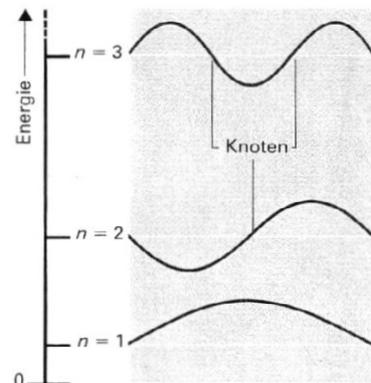


Abb.7: Energie, Quantenzahl n und Anzahl der Wellenknoten

### Anmerkung:

Die Linienspektren haben bereits gezeigt, dass Elektronen nur ganz bestimmte Energiezustände einnehmen können.

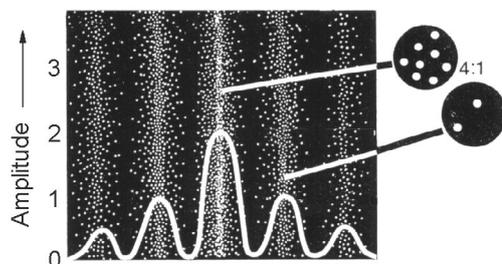
Dem Physiker E. SCHRÖDINGER <sup>1)</sup> ist es 1926 gelungen, für stehende dreidimensionale Elektronenwellen im Atom eine Wellengleichung anzugeben, die **Schrödinger-Gleichung**, die die Amplitude  $\Psi$  (Psi) mit den Raumkoordinaten verknüpft. Mit Hilfe der Wellenfunktion  $\Psi$  gelang es, durch Lösen der Schrödinger-Gleichung die Energiestufen des Elektrons im Wasserstoff zu beschreiben.

Zwischen dem Konzept, das Elektron einerseits als Teilchen, andererseits als Welle zu beschreiben, besteht ein Zusammenhang. In Abb.8 ist in das Interferenzmuster der Elektronen aus dem Doppelspaltversuch (Kap.2.1) die Amplitudenfunktion, die die Elektronenwelle nach der Interferenz besitzt, eingezeichnet.

Die Maxima dieser Funktion fallen genau an die Stellen, an denen auf dem Schirm die meisten Elektronen registriert werden.

Die genaue Analyse zeigt, dass sich die Zahl der Elektronen im Interferenzmuster vervierfacht, wenn sich die Amplitude der Elektronenwelle verdoppelt.

Abb.8: Interferenzmuster mit Amplitudenfunktion der Elektronenwelle



<sup>1)</sup> Erwin SCHRÖDINGER (1887-1961): österreichischer Physiker, Nobelpreis der Physik 1933



Das heißt die Elektronenwelle, die allein das Zustandekommen der Interferenz erklären kann, liefert zugleich das Rezept dafür, in welcher Weise sich die Elektronen auf einem Leuchtschirm manifestieren. In großer Zahl dort, wo die Amplitude der Elektronenwelle ein Maximum besitzt, weniger an den Stellen, wo diese Amplitude klein ist.

Wo beim Doppelspaltversuch im nächsten Augenblick ein Elektron auf dem Fluoreszenzschirm (Abb.4) trifft ist nicht vorhersagbar. Es könnte irgendwo auf dem Schirm sein. Als Summe vieler solcher Einzelergebnisse entsteht aber immer das gleiche Interferenzmuster, da ein Elektron mit größter Wahrscheinlichkeit an einer Stelle auftrifft, an der die Amplitude der Elektronenwelle groß ist.

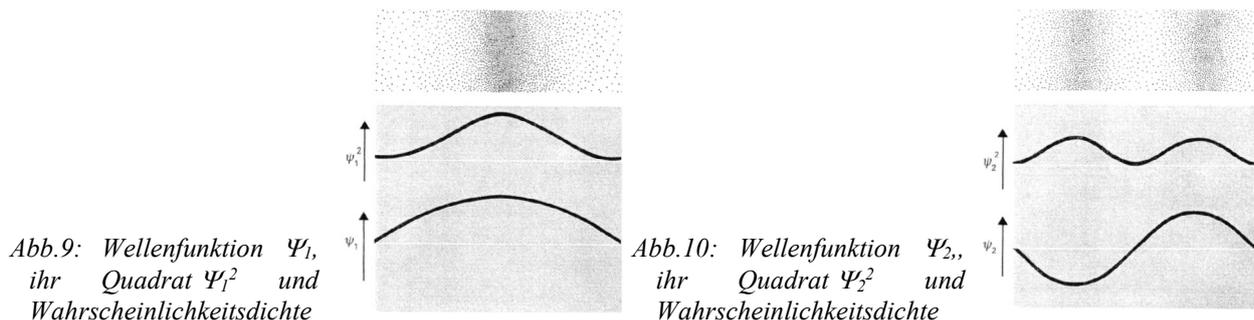
Etwa zur gleichen Zeit wie Schrödinger gelangte der Physiker W. HEISENBERG <sup>1)</sup> zu einer für die Naturwissenschaften äußerst bedeutsamen Erkenntnis:

Heisenberg betrachtete das Elektron als Teilchen und konnte beweisen, dass es prinzipiell nicht möglich ist, gleichzeitig den Ort und die Geschwindigkeit eines Elektrons exakt anzugeben. Die mathematische Formulierung dieses Zusammenhangs nennt man **Heisenbergsche Unschärferelation**.

Aus ihr folgt, dass man in der Regel keine genaue Aussage über den momentanen Aufenthaltsort des Elektrons im Atom machen kann. Es ist nur möglich, die Wahrscheinlichkeit anzugeben, das Elektron in einem bestimmten Raumbereich anzutreffen. Man gelangt so zur Angabe der **Wahrscheinlichkeitsdichte**.

Dem Physiker M. BORN <sup>2)</sup> gelang es, einen Zusammenhang zwischen der Wellenfunktion  $\Psi$  eines Elektrons und der Wahrscheinlichkeitsdichte herzustellen. Er erkannte, dass das **Quadrat der Wellenfunktion  $\Psi^2$**  ein Maß für die **Wahrscheinlichkeitsdichte** liefert.

In den Abb.9 und 10 ist dieser Zusammenhang für die zwei eindimensionale Wellen  $\Psi_1$  ( $n = 1$  d.h.  $\lambda = 2 \cdot l$ ) und  $\Psi_2$  ( $n = 2$  d.h.  $\lambda = l$ ) eingezeichnet.



Die Punktedichte entspricht der Wahrscheinlichkeitsdichte, die Anzahl der Punkte in einem bestimmten Bereich entspricht der Wahrscheinlichkeit, das Elektron in diesem Bereich anzutreffen

<sup>1)</sup> Werner HEISENBERG (1901-1976): deutscher Physiker, Nobelpreis 1932

<sup>2)</sup> Max BORN (1882-1970): in Polen geb. Physiker, Nobelpreis der Physik für Arbeiten zur Quantenmechanik und Kristallgittertheorie (1954)



### 3 Das Orbitalmodell

Die räumliche Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons nennt man **Orbital**.

Für das Elektron des Wasserstoffs ergibt sich im Grundzustand, d.h. im energieärmsten Zustand, ein kugelsymmetrisches Orbital. Solche Orbitale nennt man s-Orbitale.

Bei der zeichnerischen Darstellung durch eine Hüllfläche begrenzt man den Raum so, dass man das Elektron darin mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 90% antrifft.

#### 3.1 Quantenzahlen

Die Zahlen, die den Energie- und Schwingungszustand des Elektrons im Atom charakterisieren, nennt man Quantenzahlen.

Die **Hauptquantenzahl**  $n$  kann jede natürliche Zahl sein ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ). **Von ihr allein hängt im Wasserstoffatom die Energie der stehenden Welle ab.**

Jeder Hauptquantenzahl lassen sich **Nebenquantenzahlen**  $l$  zuordnen, wobei  $l$  die Werte  $l=0$  bis  $l=n-1$  annehmen kann.

Je nach Nebenquantenzahl erhält man andere Orbitale:

$l=0$  ergibt s-Orbitale,  $l=1$  p-Orbitale und  $l=2$  ergibt d-Orbitale

Für die **Magnetquantenzahl**  $m$  sind alle ganzzahligen Werte von  $-l$  bis  $+l$  möglich.

Durch Kombination dieser Quantenzahlen lässt sich jede mögliche stehende Welle im Wasserstoffatom charakterisieren, so ist z.B. im Grundzustand:  $n=1, l=0, m=0$ .

#### 3.2 Orbitale des Wasserstoffatoms

Das zu  $n=1, l=0, m=0$  gehörende 1s-Orbital weist eine einfache räumliche Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit auf (Abb.11).

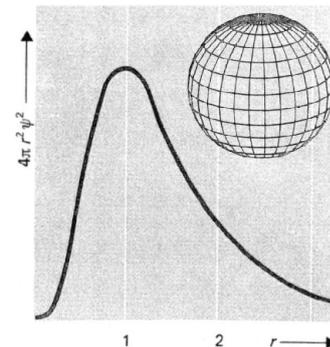


Abb.11: Orbital 1s

Dem gegenüber zeigen die s-Orbitale höherer Hauptquantenzahlen eine kompliziertere Struktur. So weist beispielsweise das 2s-Orbital eine, das 3s-Orbital zwei kugelförmige Knotenflächen auf (Abb.12 und 13). Der Radius der Kugel, die 90% der Gesamtwahrscheinlichkeit beinhaltet, wird mit zunehmender Hauptquantenzahl größer.

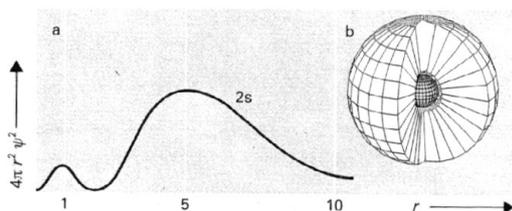


Abb.12: Orbital 2s

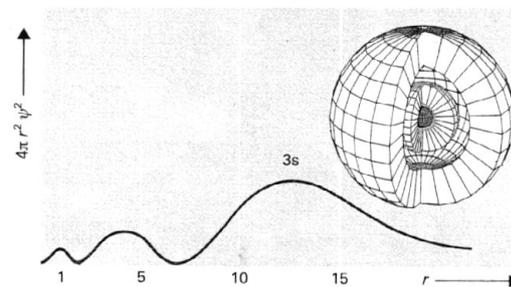
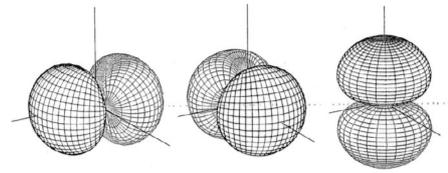


Abb.13: Orbital 3s

Die Orbitale zu  $l = 1$ , also die p-Orbitale, besitzen ungefähr die Form einer Hantel und eine durch den Kern verlaufende, ebene Knotenfläche. Den für  $l = 1$  möglichen drei Magnetquantenzahlen entsprechen insgesamt drei p-Orbitale, die so gewählt werden können, dass sie sich nur durch die Richtung ihrer Symmetrieachse unterscheiden. Man bezeichnet diese Orbitale (Abb.14) mit  $p_x$ ,  $p_y$  und  $p_z$ . Während s-Orbitale kugelsymmetrisch sind, sind p-Orbitale jeweils nur zu einer Koordinatenachse rotationssymmetrisch.

Abb.14: Orbitale  $p_x$ ,  $p_y$  und  $p_z$ 

Allgemein gilt, dass durch die Nebenquantenzahl  $l$  die Form der Orbitale bestimmt wird. Die Anzahl der für eine bestimmte Nebenquantenzahl **möglichen Magnetquantenzahlen** ist **gleich der Anzahl dieser Orbitale**. So ergeben sich für  $l = 2$  fünf d-Orbitale (Abb.15), die zusammen zum Satz der Magnetquantenzahlen  $m = -2, -1, 0, +1, +2$  gehören.

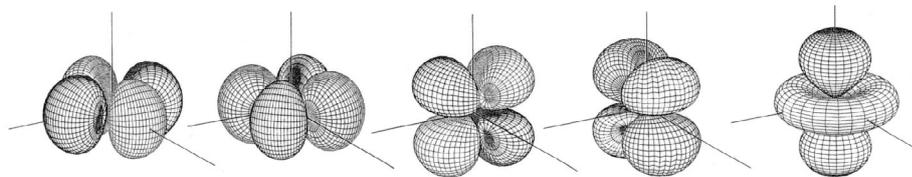


Abb.15: d- Orbitale

### 3.3 Atome mit mehreren Elektronen

In ähnlicher Weise wie für das Wasserstoffatom lassen sich Orbitale auch für Atome mit mehreren Elektronen berechnen.

Die Zuordnung („Besetzung“) beginnt beim energieärmsten Orbital und wird nach steigender Energie fortgesetzt. Die Gesamtzahl der Elektronen ist dabei gleich der Kernladungszahl des Atoms. Bei derselben Hauptquantenzahl haben –anders als beim Wasserstoffatom– die s-, p-, d- und f-Orbitale jeweils in dieser Reihenfolge zunehmende Energien.

Es hat sich ferner gezeigt, dass bei Mehrelektronensystemen die Quantenzahlen  $n$ ,  $l$  und  $m$  nicht ausreichen, um ein Elektron zu beschreiben. Man benötigt eine weitere Quantenzahl, die **Spinquantenzahl  $s$** . Bei gegebenem Orbital sind zwei Spinquantenzahlen möglich. Diese beschreiben den „Spin“ des Elektrons, den man sich modellhaft als zwei entgegengesetzte Richtungen der Eigenrotation des Elektrons vorstellen kann.

Das bedeutet, dass man einem Orbital zwei Elektronen zuordnen kann, die dann entgegengesetzten Spin besitzen müssen.

Allgemein gilt entsprechend W. PAULI <sup>1)</sup> :

#### Pauli-Prinzip:

Zwei Elektronen eines Atoms unterscheiden sich in mindestens einer Quantenzahl.

Die Zuordnung aller Elektronen eines Atoms zu Orbitalen bezeichnet man als **Elektronenkonfiguration**.

Für die Grundzustände der Atome ist in Abb. 4 die Elektronenkonfiguration bis zur Kernladungszahl 18 in der Schreibweise nach PAULING <sup>2)</sup> dargestellt:

- o Jedes Kästchen steht für ein Orbital, die Elektronen werden durch Pfeile symbolisiert, deren entgegengesetzte Richtung für entgegengesetzten Spin steht.
- o Orbitale mit gleicher Haupt- und Nebenquantenzahl, d.h. energiegeliche Orbitale, werden als zusammenhängende Kästchen geschrieben.
- o Die Zuordnung der Elektronen muss nach der Regel von Hund <sup>3)</sup> erfolgen:

<sup>1)</sup> Wolfgang PAULI (1900-1958): österreichischer Physiker

<sup>2)</sup> Linus Carl PAULING (1901-1994): amerikanischer Chemiker und Molekularbiologe, Friedensnobelpreis 1962

<sup>3)</sup> Friedrich HUND (1896-1997): deutscher Physiker



1)



2)



3)

**Regel von Hund:**

Orbitale gleicher Haupt- und Nebenquantenzahl werden zunächst einfach besetzt.

Dementsprechend werden beispielsweise die drei 2p-Orbitale zuerst nur mit je einem Elektron besetzt. Diese „ungepaarte Elektronen“ haben untereinander parallelen Spin. Erst das vierte Elektron führt –hier beim Sauerstoff- zu einer Doppelbesetzung im 2p-Niveau.

In Abb.16 ist die Elektronenkonfiguration in der **Pauling-Schreibweise** für die Atome der Elemente mit der Ordnungszahl 1 bis 18 im Grundzustand dargestellt.

Orbitale	1s	2s	2p	Orbitale	1s	2s	2p	3s	3p
H	↑			Ne	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓		
He	↑↓			Na	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑	
Li	↑↓	↑		Mg	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	
Be	↑↓	↑↓		Al	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑
B	↑↓	↑↓	↑	Si	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑ ↑
C	↑↓	↑↓	↑ ↑	P	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑ ↑ ↑
N	↑↓	↑↓	↑ ↑ ↑	S	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑ ↑ ↑ ↑
O	↑↓	↑↓	↑↓ ↑ ↑	Cl	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑ ↓ ↑ ↓ ↑
F	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑	Ar	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓

Abb.16: Elektronenkonfiguration in der Pauling-Schreibweise

Die Elektronenkonfiguration eines Atoms lässt sich auch in einer **vereinfachten Schreibweise** angeben. Dabei wird die Hauptquantenzahl mit der Angabe der Orbitalform kombiniert, die Anzahl der Elektronen gleicher Nebenquantenzahl wird als Hochzahl geschrieben.

**Beispiele:**

He:  $1s^2$

Li:  $1s^2 2s^1$

C:  $1s^2 2s^2 2p^2$

## 4 Der Aufbau des Periodensystems

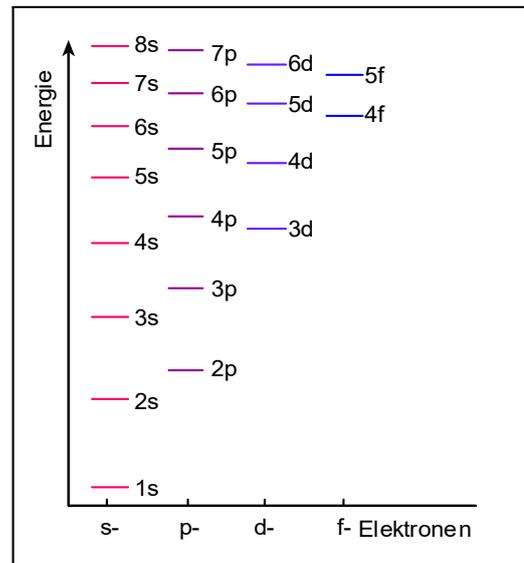
### 4.1 Hauptgruppen und Perioden

Die Wechselwirkungen der einzelnen Elektronen eines Atoms untereinander führen dazu, dass bei Atomen mit einer größeren Elektronenanzahl nicht mehr generell gilt, dass eine höhere Hauptquantenzahl des Orbitals auch einer höheren Energie des Elektrons entsprechen muss. (Abb.17)

Dies bedeutet, dass die Besetzung der Orbitalen zur Ermittlung der Elektronenkonfiguration eines Atoms im Grundzustand nicht immer in der Reihenfolge zunehmender Hauptquantenzahlen erfolgen muss.

Als Faustregel gilt, dass die Energie eines Elektrons umso größer ist, je höher der Zahlenwert der Summe von  $n + l$  ist. Beispiel; für ein 3d-Orbital ist  $n + l = 5$ , für ein 4s-Orbital ist  $n + l = 4$ .

Abb.17: Energie der Orbitale in Mehrelektronensystemen



Die sich ergebende Reihenfolge der Besetzung der Orbitale lässt sich aus einem einfachen Merkschema (Abb.18) ableiten. Man erhält sie, wenn man den diagonalen Linien, beginnend bei 1s, folgt.

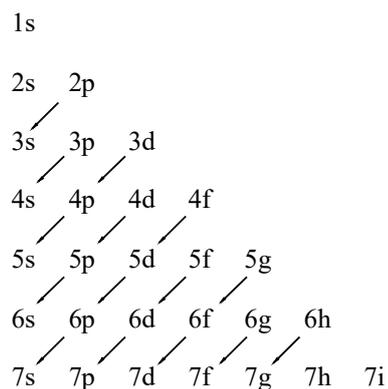


Abb.18: Merkschema zur energetischen Abfolge der Orbitale

#### Aufgabe 1:

Gib die Elektronenkonfiguration von Arsen (Ordnungszahl 33) in der Schreibweise nach Pauling und in vereinfachter Schreibweise an.

#### Lösung:

Man kann die Elektronen mit **gleicher Hauptquantenzahl** zu einer **Schale** zusammenfassen. Mit größer werdender Hauptquantenzahl nimmt auch der Radius dieser Kugelschalen zu. Die innerste, der Hauptquantenzahl  $n = 1$  entsprechende Schale, wird als K-Schale bezeichnet. Darauf folgen die L-, M-, N-, O-, P- und Q-Schalen.

**Aufgabe 2:**

- a) Gib die Elektronenkonfiguration von Lithium, Kohlenstoff und Stickstoff in der Schreibweise nach Pauling  
b) Gib die Elektronenkonfiguration von Silizium, Phosphor und Natrium in vereinfachter Schreibweise an.

**Lösung:**

Im Periodensystem der Elemente (Abb.22) spiegelt sich der Schalenbau der Atome wieder. Alle in einer **Periode** d.h. in einer Zeile stehenden Atome besitzen dieselbe **Anzahl von Schalen**.

**Die Anzahl der in einer Periode stehenden Atome bzw. Elemente entspricht der maximalen Anzahl der bei einer Hauptquantenzahl  $n$  möglichen Quantenzahlkombinationen.**

In der ersten Periode finden wir deshalb nur zwei Elemente, entsprechend der maximalen Anzahl von Elektronen des 1s-Orbitals.

Die zweite Periode umfasst acht Elemente, entsprechend der maximalen Gesamtzahl der Elektronen in den s- und p-Orbitalen der Hauptquantenzahl zwei.

Bei den Atomen in den acht **Hauptgruppen** sind die energetisch höchsten besetzten Orbitale s- oder p-Orbitale (siehe vorheriges Beispiel).

**Aufgabe 3:**

Gib die Elektronenkonfiguration von Chlor und Brom in vereinfachter Schreibweise an.

**Lösung:**

Die untereinander, d.h. in einer **Gruppe** des Periodensystems stehenden Elemente besitzen oft ähnliche **chemische Eigenschaften**. Betrachtet man die Elektronenkonfiguration der Atome von Elementen einer Hauptgruppe, so stellt man fest, dass die **Verteilung** der Elektronen **auf** die **Orbitale** der jeweils äußeren Schalen offenbar gleich ist. Da die Elektronenkonfiguration in der äußeren Schale offenbar entscheidend ist für das chemische Verhalten der Atome, genügt es oft, nur die Konfiguration der **Außenelektronen** (Valenzelektronen) anzugeben. So besitzen z.B. alle Halogenatome die Außenkonfiguration  $s^2p^5$  (siehe Aufgabe 3) und alle Alkalimetalle die Außenkonfiguration  $s^1$  (siehe Aufgabe 2).

## 4.2 Nebengruppen

**Aufgabe 4:**

Gib die Elektronenkonfiguration von Vanadium, Eisen und Zirkonium in vereinfachter Schreibweise an.

**Lösung:**

### o Äußere Übergangselemente

Die Nebengruppen enthalten Atome, deren **energetisch höchste besetzte Orbitale d-Orbitale** sind. Die entsprechenden Elemente heißen **äußere Übergangselemente** oder **-metalle**.

Es sind die Elemente mit den Ordnungszahlen 21 bis 30 (Scandium bis Zink) bzw. 39 bis 48 (Yttrium bis Cadmium). Jede Periode enthält 10 Elemente, entsprechend der maximalen Elektronenanzahl in den fünf d-Orbitalen.

Da sich die Energie der Elektronen dieser d-Orbitale nur wenig von der der Elektronen des äußeren s-Orbitals unterscheidet, können auch die ersteren als Valenzelektronen wirken.

### o Innere Übergangselemente

Die Atome, bei denen als letztes die **4f- bzw. 5f-Orbitalen** besetzt werden, bezeichnet man als **innere Übergangselemente** oder **-metalle**.

Bei den Atomen (der 6. Periode) mit den Kernladungszahlen 58 bis 71 (Ce bis Lu) wird dementsprechend zunächst die äußere Elektronenschale (**6s**) mit **2 Elektronen** besetzt. Anschließend wird das (energetisch) niedrigere **4f-Orbital** schrittweise (mit zunehmender Ordnungszahl) mit bis zu 14 Elektronen besetzt. Dieser ähnliche Atombau führt zu einem ähnlichen chemischen Verhalten der Elemente. Man fasst sie deshalb mit dem Lanthan zur Gruppe der **Lanthanoide** zusammen.

Entsprechendes gilt für die Atome (der 7. Periode) mit Kernladungszahl 90 bis 103 (Th bis Lr). Sie besitzen eine mit **2 Elektronen** besetzte äußere Elektronenschale (**7s**), während das niedrigere **5f-Orbital** mit zunehmender Ordnungszahl besetzt wird. Diese Elemente bilden zusammen mit dem Actinium die Gruppe der **Actinoide**.

## 4.3 Atomradius und Ionisierungsenergie

Da bei jeder neuen Periode eine Schale hinzukommt, nimmt der **Atomradius** im Periodensystem von **oben nach unten zu** (Abb.19).

**Innerhalb** einer **Periode** nimmt der **Atomradius mit zunehmender Kernladungszahl ab**, da die Elektronen vom Kern stärker angezogen werden.

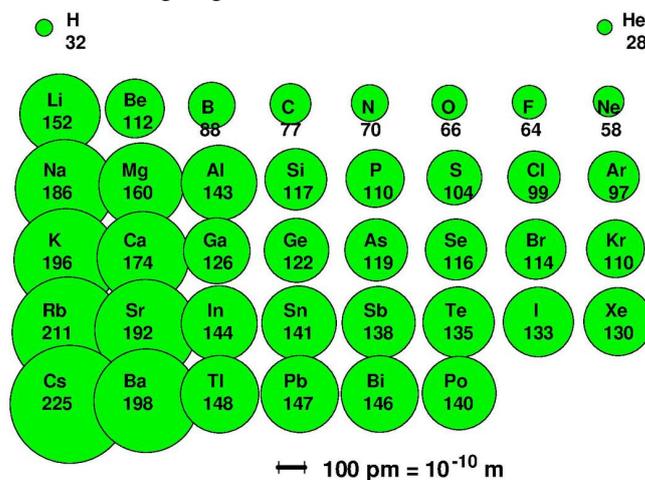


Abb.19: Atomradien im PSE (Quelle:

[www.commonswiki.org/wiki](http://www.commonswiki.org/wiki))

Atomradius und Kernladungszahl bestimmen wesentlich die Energie, die zur Abspaltung eines Elektrons aus dem Atom notwendig ist, **die Ionisierungsenergie**.

Die **Ionisierungsenergie** (cf. -V.B1-) steigt mit **zunehmender Kernladungszahl** und **abnehmendem Atomradius**.

Die sich daraus ergebende periodische Veränderung der Ionisierungsenergie in Abhängigkeit der Kernladungszahl (Abb.20) spiegelt den Aufbau der Atome wieder.

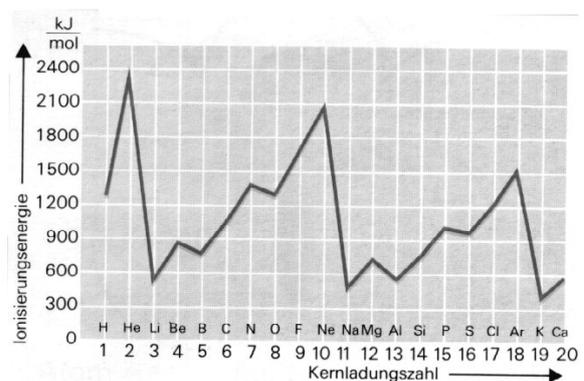


Abb.20: Ionisierungsenergie



Die 1. Ionisierungsenergie (entsprechend dem Verlust eines Elektrons) ist für die Elemente 1-102 in nachfolgender Abb.21 dargestellt.

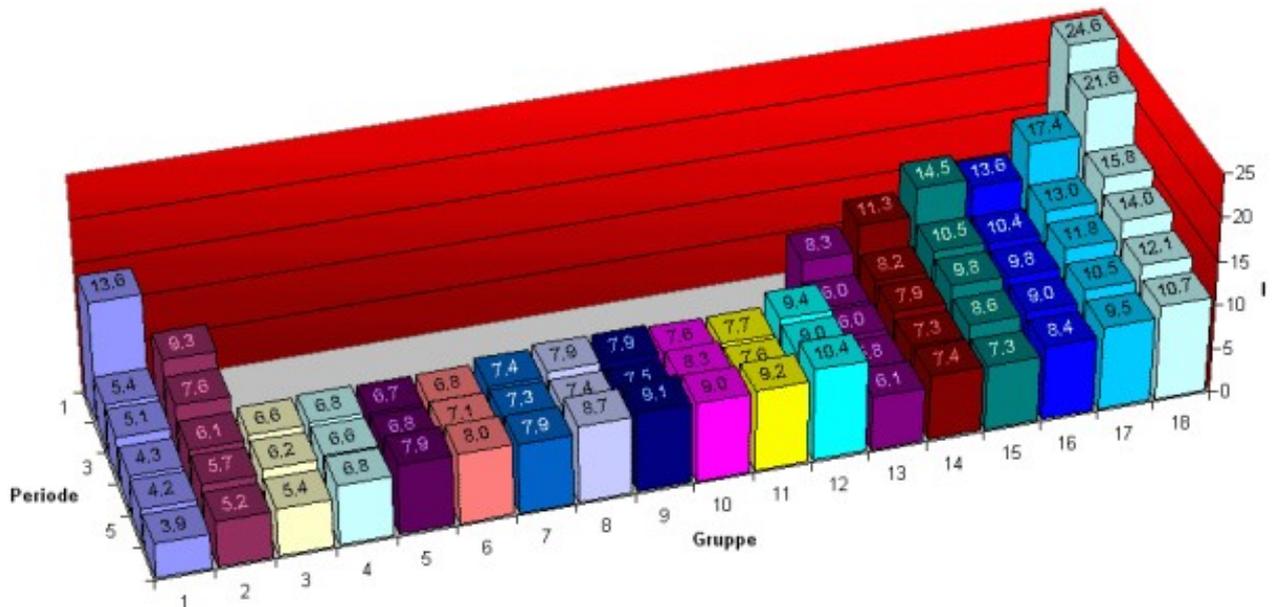


Abb.21: Ionisierungsenergie im PSE (Quelle: [www.chemglobe.org/general/atomeigenschaften/ionisierung.php](http://www.chemglobe.org/general/atomeigenschaften/ionisierung.php))

#### Anmerkung:

Für die an Element 103 (Lawrencium) anschließenden Elemente 104–111 wurden 1997 (bzw. 2003 für Ds und 2004 für Rg) nachfolgende Bezeichnungen vom „Committee on Nomenclature of Inorganic Chemistry“ angenommen:

104 Rutherfordium (Rf)	105 Dubnium (Db)	106 Seaborgium (Sg)	107 Bohrium (Bh)
108 Hassium (Hs)	109 Meitnerium (Mt)	110 Darmstadtium (Ds)	111 Roentgenium (Rg).

Des Weiteren wurden bisher festgelegt:

112 Copernicium (Cn)	114 Flerovium (Fl)	116 Livermorium (Lv)
----------------------	--------------------	----------------------

## 4.4 Aufgaben

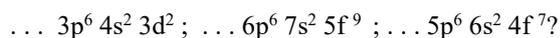
**Aufgabe 5:** Gib den Namen und die Elektronenkonfiguration der Atome mit den Kernladungszahlen 16, 27 und 34 in vereinfachter Schreibweise an.

**Aufgabe 6:** Welche gemeinsame Außenkonfiguration besitzen die Atome der vierten bzw. der sechsten Hauptgruppe?

**Aufgabe 7:** Ordne folgenden Elektronenkonfigurationen die entsprechenden Atome zu:



**Aufgabe 8:** Zu welcher Gruppe von Elementen gehören die Atome mit folgenden Elektronenkonfigurationen:



### Periodensystem der Elemente

	I																	VIII																										
1	1 <b>H</b> Wasserstoff 1,01																	2 <b>He</b> Helium 4,00																										
2	3 <b>Li</b> Lithium 6,94	4 <b>Be</b> Beryllium 9,01																	5 <b>B</b> Bor 10,81	6 <b>C</b> Kohlenstoff 12,01	7 <b>N</b> Stickstoff 14,01	8 <b>O</b> Sauerstoff 15,999	9 <b>F</b> Fluor 18,998	10 <b>Ne</b> Neon 20,18																				
3	11 <b>Na</b> Natrium 22,99	12 <b>Mg</b> Magnesium 24,31	13 <b>Al</b> Aluminium 26,98	14 <b>Si</b> Silicium 28,09	15 <b>P</b> Phosphor 30,97	16 <b>S</b> Schwefel 32,07	17 <b>Cl</b> Chlor 35,45	18 <b>Ar</b> Argon 39,95									19 <b>K</b> Kalium 39,10	20 <b>Ca</b> Calcium 40,08	21 <b>Sc</b> Scandium 44,96	22 <b>Ti</b> Titan 47,88	23 <b>V</b> Vanadium 50,94	24 <b>Cr</b> Chrom 52,00	25 <b>Mn</b> Mangan 54,94	26 <b>Fe</b> Eisen 55,85	27 <b>Co</b> Cobalt 58,93	28 <b>Ni</b> Nickel 58,70	29 <b>Cu</b> Kupfer 63,55	30 <b>Zn</b> Zink 65,41	31 <b>Ga</b> Gallium 69,72	32 <b>Ge</b> Germanium 72,64	33 <b>As</b> Arsen 74,92	34 <b>Se</b> Selen 78,96	35 <b>Br</b> Brom 79,90	36 <b>Kr</b> Krypton 83,80										
4	37 <b>Rb</b> Rubidium 85,47	38 <b>Sr</b> Strontium 87,62	39 <b>Y</b> Yttrium 88,91	40 <b>Zr</b> Zirkon 91,22	41 <b>Nb</b> Niob 92,91	42 <b>Mo</b> Molybdän 95,94	43 <b>Tc</b> Technetium (98)	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101,07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102,91	46 <b>Pd</b> Palladium 106,42	47 <b>Ag</b> Silber 107,87	48 <b>Cd</b> Cadmium 112,41	49 <b>In</b> Indium 114,82	50 <b>Sn</b> Zinn 118,71	51 <b>Sb</b> Antimon 121,76	52 <b>Te</b> Tellur 127,60	53 <b>I</b> Iod 126,90	54 <b>Xe</b> Xenon 131,29									55 <b>Cs</b> Cäsium 132,91	56 <b>Ba</b> Barium 137,33	57 <b>* La</b>	72 <b>Hf</b> Hafnium 178,49	73 <b>Ta</b> Tantal 180,95	74 <b>W</b> Wolfram 183,84	75 <b>Re</b> Rhenium 186,21	76 <b>Os</b> Osmium 196,23	77 <b>Ir</b> Iridium 192,22	78 <b>Pt</b> Platin 195,08	79 <b>Au</b> Gold 196,97	80 <b>Hg</b> Quecksilber 200,59	81 <b>Tl</b> Thallium 204,38	82 <b>Pb</b> Blei 207,2	83 <b>Bi</b> Bismut 208,98	84 <b>Po</b> Polonium (209)	85 <b>At</b> Astat (210)	86 <b>Rn</b> Radon (222)
5	87 <b>Fr</b> Francium (223)	88 <b>Ra</b> Radium (226)	89 <b>** Ac</b>	104 <b>Rf</b> Rutherfordium (261)	105 <b>Db</b> Dubnium (262)	106 <b>Sg</b> Seaborgium (263)	107 <b>Bh</b> Bohrium (264)	108 <b>Hs</b> Hassium (265)	109 <b>Mt</b> Meitnerium (266)	110 <b>Ds</b> Darmstadtium (269)	111 <b>Rg</b> Röntgenium (272)	112 <b>Cn</b> Copernicium (285)	113 <b>Nh</b> Nihonium (286)	114 <b>Fl</b> Flerovium (289)	115 <b>Mc</b> Moscovium (288)	116 <b>Lv</b> Livermorium (292)	117 <b>Ts</b> Tennessine (294)	118 <b>Og</b> Oganesson (294)									87 <b>La</b> Lanthan 138,91	88 <b>Ce</b> Cer 140,12	89 <b>Pr</b> Praseodym 140,91	90 <b>Nd</b> Neodym 144,24	91 <b>Pm</b> Promethium 144,90	92 <b>Sm</b> Samarium 150,36	93 <b>Eu</b> Europium 151,96	94 <b>Gd</b> Gadolinium 157,25	95 <b>Tb</b> Terbium 158,93	96 <b>Dy</b> Dysprosium 162,50	97 <b>Ho</b> Holmium 164,93	98 <b>Er</b> Erbium 167,26	99 <b>Tm</b> Thulium 168,93	100 <b>Yb</b> Ytterbium 173,05	101 <b>Lu</b> Lutetium 174,97			
6	89 <b>Ac</b> Actinium (227)	90 <b>Th</b> Thorium 232,04	91 <b>Pa</b> Protactinium 231,04	92 <b>U</b> Uran 238,03	93 <b>Np</b> Neptunium 237,05	94 <b>Pu</b> Plutonium (244,10)	95 <b>Am</b> Americium (243,10)	96 <b>Cm</b> Curium (247,10)	97 <b>Bk</b> Berkelium (247,10)	98 <b>Cf</b> Californium (251,10)	99 <b>Es</b> Einsteinium (254,10)	100 <b>Fm</b> Fermium (257,10)	101 <b>Md</b> Mendelevium (258)	102 <b>No</b> Nobelium (259)	103 <b>Lr</b> Lawrencium (260)																													

Abb.22: Periodensystem der Elemente (PSE) (Quelle: [www.sofatutor.at/chemie](http://www.sofatutor.at/chemie), überarbeitet)



## C Säure-Base-Reaktionen

### 1 Autoprotolyse des Wassers und pH-Wert

#### 1.1 Stoffmengenkonzentration

Die **Stoffmengenkonzentration** eines gelösten Stoffes ist der Quotient aus der Stoffmenge und dem Volumen der Lösung.

$$c(\text{X}) = \frac{n(\text{X})}{V(\text{Ls})}$$

$c(\text{X})$ : Stoffmengenkonzentration der Stoffteilchen X in mol/L

$n(\text{X})$ : Menge an Teilchen des Stoffes X in mol

$V(\text{Ls})$ : Volumen der Lösung Ls in L

#### Aufgabe 1:

Berechne die Konzentration von 200 ml Natronlauge NaOH, die durch Auflösen von 10 g Natriumhydroxid NaOH hergestellt wurde.

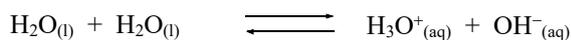
#### Lösung 1:

#### 1.2 Ionenprodukt des Wassers

Selbst in reinstem Wassers mißt man eine **elektrische Leitfähigkeit**. Diese läßt sich nur durch das Vorhandensein von Ionen erklären.

Die Bildung dieser Ionen erfolgt durch **Autoprotolyse** des Wassers, d.h. durch Protonenübertragung zwischen den Wassermolekülen.

Die Autoprotolyse des Wassers ergibt nachfolgendes chemisches Gleichgewicht:



Das **Massenwirkungsgesetz** beschreibt das Gleichgewicht, das hier vorliegt:

$$K = \frac{c(\text{H}_3\text{O}^+) \cdot c(\text{OH}^-)}{c^2(\text{H}_2\text{O})}$$

Das Gleichgewicht liegt sehr weit links. Das heißt die Konzentration der **Oxoniumionen  $\text{H}_3\text{O}^+$**  und der **Hydroxidionen  $\text{OH}^-$**  ist sehr gering,

sie beträgt bei 24°C  $c(\text{H}_3\text{O}^+) = c(\text{OH}^-) = 10^{-7} \text{ mol/L}$

Das Produkt  $c(\text{H}_3\text{O}^+) \cdot c(\text{OH}^-)$  bezeichnet man als **Ionenprodukt des Wassers**.

Bei 24°C beträgt der Zahlenwert des Ionenproduktes  **$1,000 \cdot 10^{-14} \text{ mol}^2/\text{L}^2$**

---

Hinweis zum Kapitel „Säure-Base-Reaktionen“:

Auszüge aus elemente Chemie II  
Klett  
ISBN 3-12-759800-9  
und ISBN 3-12-756700-6



**Aufgabe 2:**

Berechne die „Stoffmengenkonzentration“ von reinem Wasser.

**Lösung 2:****1.3 pH-Wert**

Die Gleichung für das Ionenprodukt (Autoprotolyse) des Wassers gilt mit ausreichender Genauigkeit auch für verdünnte Lösungen (z.B. Säuren oder Salze).

Die Konzentrationen von Oxonium- und Hydroxidionen hängen demnach voneinander ab. Nimmt die Konzentration einer Ionenart zu, nimmt die der anderen entsprechend ab, damit die Gleichgewichtskonstante  $K_w$  erreicht wird.

In wässrigen Lösungen von Säuren sind somit Hydroxidionen  $\text{OH}^-$  vorhanden, ebenso liegen in wässrigen Lösungen von Basen Oxoniumionen  $\text{H}_3\text{O}^+$  vor. **Wässrige Lösungen können daher sowohl durch ihre Konzentration an Hydroxidionen  $\text{OH}^-$  als auch an Oxoniumionen  $\text{H}_3\text{O}^+$  gekennzeichnet werden.**

Eine wässrige Lösung wird als **neutral** bezeichnet, wenn  $c(\text{H}_3\text{O}^+) = c(\text{OH}^-) = 10^{-7} \text{ mol/L}$ .

Eine wässrige Lösung wird als **sauer** bezeichnet, wenn  $c(\text{H}_3\text{O}^+) > 10^{-7} \text{ mol/L}$ .

Eine wässrige Lösung wird als **basisch** bezeichnet, wenn  $c(\text{H}_3\text{O}^+) < 10^{-7} \text{ mol/L}$ .

Man erhält einfachere Zahlenwerte, indem man die Konzentration an Oxoniumionen in Form des **pH-Wertes** beschreibt:

$$\text{pH} = -\log c(\text{H}_3\text{O}^+)$$

Analog ist der **pOH-Wert** definiert:

$$\text{pOH} = -\log c(\text{OH}^-)$$

Dabei gilt:

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad (\text{bei } 24^\circ\text{C})$$

Eine wässrige Lösung wird als **neutral** bezeichnet, wenn **pH = 7**.

Eine wässrige Lösung wird als **sauer** bezeichnet, wenn **pH < 7**.

Eine wässrige Lösung wird als **basisch** bezeichnet, wenn **pH > 7**.

Für wässrige Lösungen wird die **pH-Skala von 0 bis 14** verwendet. Bei pH-Werten unter 0 bzw. über 14 treten so starke Wechselwirkungen zwischen den Ionen auf, daß das Ionenprodukt des Wassers nicht mehr  $10^{-14} \text{ mol}^2/\text{L}^2$  ist.

**Aufgabe 3:**

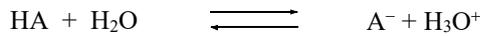
- Die Oxoniumionen-Konzentration des Speichels beträgt ca.  $199,5 \cdot 10^{-9} \text{ mol/L}$ . Wie groß ist der pH-Wert?
- Die Hydroxidionen-Konzentration einer Natronlauge-Lösung beträgt  $0,03 \text{ mol/L}$ . Wie groß ist der pH-Wert?
- Der pH-Wert der Magensäfte beträgt  $0,9$  bis  $1,7$ . Wie hoch sind die Oxoniumionen-Konzentrationen?
- Der pH-Wert einer Lösung an Kalilauge beträgt  $8$ . Wie hoch ist die Hydroxidionen-Konzentration?



## 2 Stärke von Säuren und Basen

### 2.1 Säure- und Basekonstante

Zum Vergleich der Stärke von Säuren werden ihre Reaktionen mit Basen betrachtet. Als Bezugsbase nimmt man Wasser:



Das **Massenwirkungsgesetz** beschreibt das Gleichgewicht, das hier vorliegt:

$$K = \frac{c(\text{H}_3\text{O}^+) \cdot c(\text{A}^-)}{c(\text{HA}) \cdot c(\text{H}_2\text{O})}$$

In verdünnten wässrigen Lösungen kann die Konzentration des Wassers als konstant betrachtet werden. Daraus folgt:

$$K_S = K \cdot c(\text{H}_2\text{O})$$

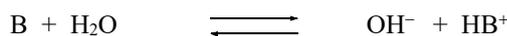
$K_S = \frac{c(\text{H}_3\text{O}^+) \cdot c(\text{A}^-)}{c(\text{HA})}$	$K_S$ ist die <b>Säurekonstante</b> .
--	---------------------------------------

Die Säurekonstante ist von der **Art der Säure** und der **Temperatur abhängig**. Sie beschreibt die **Stärke einer Säure in wässriger Lösung**.

Sie ist **unabhängig** von der **Konzentration** der Säure.

Je **größer  $K_S$**  ist, desto **stärker** ist die Säure.

Analog gilt für Basen:



Massenwirkungsgesetz:

$$K =$$

In verdünnten wässrigen Lösungen (Konzentration des Wassers annäherungsweise konstant) gilt:

$$K_B =$$

$K_B = \frac{c(\text{HB}^+) \cdot c(\text{OH}^-)}{c(\text{B})}$	$K_B$ ist die <b>Basekonstante</b> .
---	--------------------------------------

Die Basekonstante ist von der **Art der Base** und der **Temperatur abhängig**. Sie beschreibt die **Stärke einer Base in wässriger Lösung**.

Sie ist **unabhängig** von der **Konzentration** der Base.

Je **größer  $K_B$**  ist, desto **stärker** ist die Base.

### 2.2 Säure- und Baseexponent

Anstelle der Säurekonstante verwendet man oft den **p $K_S$ -Wert**. Es ist der negative dekadische Logarithmus des Zahlenwertes der Säurekonstante.

$\text{p}K_S = -\log K_S$	$\text{p}K_S$ ist der <b>Säureexponent</b> . Je <b>kleiner</b> der $\text{p}K_S$ -Wert, desto <b>stärker</b> ist eine Säure.
---------------------------	--

Analog gilt:

$\text{p}K_B = -\log K_B$	$\text{p}K_B$ ist der <b>Baseexponent</b> . Je <b>kleiner</b> der $\text{p}K_B$ -Wert, desto <b>stärker</b> ist eine Base.
---------------------------	--



$pK_S$ - und  $pK_B$ -Werte ermöglichen die Einteilung von Säuren und Basen nach ihrer Stärke. In Abb.1 sind die Säureexponenten einiger Säuren dargestellt.

	pKs	Säure	
	Vollständige Protonenabgabe	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	sehr starke Säuren
	-1,74	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	-----
	-1,32	HNO <sub>3</sub>	starke Säuren
	2,13	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	
	3,14	HF	----- (pK <sub>S</sub> = 4)
	4,75	CH <sub>3</sub> COOH	schwache Säuren
	6,92	H <sub>2</sub> S	
	15,74	H <sub>2</sub> O	
	Keine Protonenabgabe	NH <sub>3</sub> OH <sup>-</sup>	sehr schwache Säuren

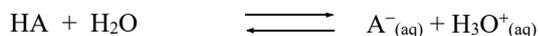
Abb.1: Säureexponenten in wässriger Lösung

#### Aufgabe 4:

- Berechne den pH-Wert von Salzsäure der Konzentration 0,2 mol/L.
- Die wässrige Lösung einer schwachen Säure der Ausgangskonzentration  $c_0(\text{HA}) = 0,2 \text{ mol/L}$  hat den pH-Wert 3. Berechne die Säurekonstante und den Säureexponent unter den Annahmen  $c(\text{HA}) \approx c_0(\text{HA})$  und  $c(\text{H}_3\text{O}^+) \approx c(\text{A}^-)$ .
- Berechne den Säureexponenten einer schwachen Säure der Ausgangskonzentration  $c_0(\text{HA}) = 0,2 \text{ mol/L}$  mit dem pH-Wert 2,72 (gleiche Annahmen wie unter b)). Vergleiche mit dem Ergebnis unter b).

## 2.3 Protolysegrad

Betrachten wir die Gleichgewichtsreaktion beim Herstellen einer Säure HA.



Es stellt sich ein Gleichgewicht ein. Die Säure wird durch den Anteil an Oxoniumionen charakterisiert, die sich gebildet haben. Hierbei führt man den Protolysegrad ein:

Der **Protolysegrad** einer **schwachen Säure** errechnet sich aus dem Verhältnis der Konzentration der gebildeten Säurerestionen zur Ausgangskonzentration der Säure.

$$\alpha = \frac{c(\text{A}^-)}{c_0(\text{HA})}$$

$\alpha$ : Protolysegrad ohne Einheit  
 $c(\text{A}^-)$ : Konzentration des Säurerestions in mol/l  
 $c_0(\text{HA})$ : Ausgangskonzentration der Säure in mol/l

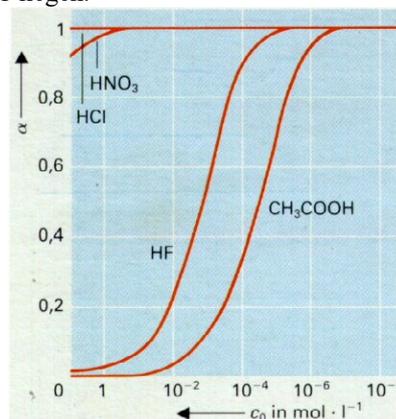
Der Protolysegrad  $\alpha$  kann entsprechend seiner Definition nur zwischen 0 und 1 liegen.

Ein Protolysegrad  $\alpha = 1$  bedeutet daß die Säure **vollständig dissoziiert** d.h. die Ausgangskonzentration  $c_0(\text{HA})$  der Säure gleich der Konzentration  $c(\text{A}^-)$  der Säurerestionen ist. Dies gilt für **starke Säuren**.

Der Protolysegrad einer schwachen Säure hängt ebenso wie der Protolysegrad des Wassers von der **Temperatur** ab. Mit zunehmender Temperatur steigt der Protolysegrad.

Bei geringerer Ausgangskonzentration  $c_0(\text{HA})$  nimmt der Protolysegrad  $\alpha$  zu (Abb.2), d.h. bei **stärkerer Verdünnung entstehen mehr Säurerestionen**  $\text{A}^-$ . Daher ist der Protolysegrad nicht geeignet, die Stärke einer Säure zu beschreiben.

Abb.2: Protolysegrad und Ausgangskonzentration



**Aufgabe 5:**

Berechne den Protolysegrad  $\alpha$  der Säure aus Aufgabe 4b) unter der Annahme  $c(\text{H}_3\text{O}^+) \approx c(\text{A}^-)$ .

**3 pH-Werte wässriger Lösungen von Säuren****3.1 pH-Werte starker Säuren**

Sehr starke Säuren HA reagieren selbst bei Ausgangskonzentrationen um 1 mol/l vollständig mit Wasser. (Protolysegrad  $\alpha = 1$ ):



Das bedeutet daß die Konzentration  $c(\text{A}^-)$  gleich der Ausgangskonzentration  $c_0(\text{HA})$  ist.

Für Konzentrationen  $c_0(\text{HA}) \geq 10^{-6}$  mol/l kann man die Oxoniumionen aus dem Autoprotolyse-Gleichgewicht des Wassers vernachlässigen, somit erhält man:  $c(\text{H}_3\text{O}^+) \approx c(\text{A}^-)$

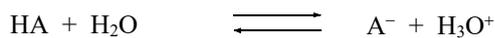
Daraus ergibt sich für den pH-Wert:

$$\text{pH} = -\log c(\text{H}_3\text{O}^+)$$

$$\text{pH} = -\log c_0(\text{HA})$$

**3.2 pH-Werte schwacher Säuren**

Schwache Säuren HA mit  $\text{pK}_s \geq 4$  reagieren nur in geringerem Ausmaß mit Wasser (Protolysegrad  $\alpha \ll 1$ ):



Daher ist die Konzentration  $c$  einer Säure ungefähr gleich ihrer Ausgangskonzentration  $c_0$ :  $c(\text{HA}) \approx c_0(\text{HA})$

Für Konzentrationen  $c_0(\text{HA}) \geq 10^{-6}$  mol/l kann man die Oxoniumionen aus dem Autoprotolyse-Gleichgewicht des Wassers vernachlässigen, somit erhält man:  $c(\text{H}_3\text{O}^+) \approx c(\text{A}^-)$

Unter Berücksichtigung dieser beiden Näherungen erhält man für die Säurekonstante:

$$K_S = \frac{c(\text{A}^-) \cdot c(\text{H}_3\text{O}^+)}{c(\text{HA})}$$

$$K_S \approx \frac{c^2(\text{H}_3\text{O}^+)}{c_0(\text{HA})} \Rightarrow c(\text{H}_3\text{O}^+) = \sqrt{K_S \cdot c_0(\text{HA})}$$

Daraus errechnet sich der pH-Wert wie folgt:

$$\text{pH} = -\log c(\text{H}_3\text{O}^+)$$

$$\text{pH} = \frac{1}{2} \cdot (\text{pK}_s - \log c_0(\text{HA}))$$

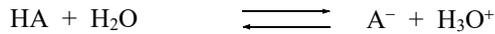
**Aufgabe 6:**

- Wie groß ist der pH-Wert von Salzsäure der Ausgangskonzentration  $c_0(\text{HCl}) = 0,01$  mol/L.
- Berechne den pH-Wert von Essigsäure ( $\text{pK}_s = 4,75$ ) der Ausgangskonzentration  $c_0(\text{CH}_3\text{COOH}) = 0,01$  mol/L. Vergleiche den Zahlenwert mit dem aus a) und denen aus Aufgabe 4b) und c).



## 4 Gemische von starken und schwachen Säuren

Wenn man zu der wässrigen Lösung einer schwachen Säure etwas starke Säure gibt, wird das Protolysegleichgewicht der schwachen Säure weit nach links verschoben:



Die Konzentration der Anionen  $c(\text{A}^-)$  wird sehr klein. Die Konzentration der Oxoniumionen  $\text{H}_3\text{O}^+$  aus diesem Protolysegleichgewicht wird genauso klein. Da die Protonenabgabe durch Zugabe der starken Säure zurückgedrängt wird, trägt die schwache Säure zur Oxoniumionen-Konzentration quasi nichts bei.

**Das Gemisch einer starken Säure und einer schwachen Säure kann daher zur pH-Berechnung wie eine starke Säure behandelt werden.**

## 5 pH-Werte wässriger Lösungen von Basen

Wenn man in den Gleichungen zur Berechnung des pH-Wertes von Säuren die Größen  $K_S$  und  $c(\text{H}_3\text{O}^+)$  durch  $K_B$  und  $c(\text{OH}^-)$  ersetzt, erhält man die Berechnungsformeln für pOH.

Der pH-Wert der Basen errechnet sich dann aus  $\text{pH} + \text{pOH} = \text{p}K_W = 14$ .

Man erhält somit folgende Beziehungen:

Starke Basen:

$$\text{pOH} = -\log c_0(\text{B})$$

Schwache Basen:

$$\text{pOH} = \frac{1}{2} \cdot (\text{p}K_B - \log c_0(\text{B}))$$

## 6 Aufgaben

### Aufgabe 7:

- Es sollen 500 ml Natronlauge der Stoffmengenkonzentration  $c(\text{NaOH}) = 0,2 \text{ mol/L}$  hergestellt werden. Welche Masse an Natriumhydroxid ist erforderlich?
- Welchen pH-Wert hat die Lösung?
- Durch Verdünnen soll Natronlauge der Stoffmengenkonzentration  $c(\text{NaOH}) = 0,05 \text{ mol/L}$  hergestellt werden. Welches Volumen Wasser ist zuzusetzen?
- Berechne den pH-Wert der verdünnten Natronlauge.

### Aufgabe 8:

Propansäure  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$  der Ausgangskonzentration  $c_0(\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}) = 0,1 \text{ mol/L}$  hat den pH-Wert 2,94. Berechne den Säureexponenten und die Säurekonstante.

### Aufgabe 9:

Die wässrige Lösung einer schwachen Base der Ausgangskonzentration  $10^{-3} \text{ mol/L}$  hat den pH-Wert 10,125. Berechne die Basekonstante.

### Aufgabe 10:

Ordne nachfolgende (schwache) Säuren nach ihrer Stärke:

$$\text{HA}_{\text{a)}}: c_0 = 10^{-2} \text{ mol/L}, \text{pH} = 3,38$$

$$\text{HA}_{\text{b)}}: c_0 = 10^{-3} \text{ mol/L}, \text{pH} = 4,02$$

$$\text{HA}_{\text{c)}}: c_0 = 10^{-4} \text{ mol/L}, \text{pH} = 4,02$$



## VI Kernphysik

### A Atomkerne

#### 1 Wichtigste Eigenschaften der Atomkerne

##### 1.1 Elektrische Ladung der Atomkerne

Die Atomkerne besitzen eine positive elektrische Ladung. Diese beträgt stets ein ganzzahliges Vielfaches der elektrischen Elementarladung  $e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

**Unter der Kernladungszahl  $Z$  eines Atoms versteht man die Anzahl der positiven Elementarladungen des Atomkernes.**

Die Kernladungszahl  $Z$  ist gleich der Ordnungszahl des betreffenden Elementes im Periodensystem der Elemente.

##### 1.2 Masse der Atomkerne

Im Atomkern ist fast die gesamte Masse des Atoms vereinigt. Die Atomkerne sind aus kleineren Bausteinen, den Protonen und den Neutronen, zusammengesetzt, die man als **Nukleonen** bezeichnet.

Proton (p):	Ladung: $+e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
	Masse: $m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1836,1 \cdot m_e$
Neutron (n):	Ladung: 0
	Masse: $m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1838,6 \cdot m_e$

**Unter der Massenzahl  $A$  eines Atomkernes versteht man die Anzahl der den Kern bildenden Nukleonen.**

##### 1.3 Kernsymbolik

Es ist in der Kernphysik üblich, die folgende Symbolik zu verwenden:

**Ein Atomkern mit dem chemischen Symbol  $X$ , der Ordnungszahl  $Z$  und der Massenzahl  $A$  wird in der Form geschrieben.**



Beispiele:



Eine durch die beiden Zahlen  $A$  und  $Z$  charakterisierte Atomsorte wird als ein **Nuklid** bezeichnet.

Dabei sind also nicht die Atomkerne, sondern die ganzen Atome, d.h. die Atomkerne und die vollständigen Elektronenhüllen gemeint.

**Unter einem Nuklid versteht man eine Atomsorte, bei der alle Atome die gleichen Kerneigenschaften haben, d.h. deren Atomkerne alle die gleiche Ordnungszahl  $Z$  und die gleiche Massenzahl  $A$  haben.**

Das bedeutet, dass verschiedene Nuklide sich durch ihre Ordnungszahl oder ihre Massenzahl unterscheiden können.

---

Hinweis zum Kapitel „Kernphysik“:

Auszüge aus Höfling:  
Physik Band II Teil 3  
Dümmler  
ISBN 3-427-41163-X





c) Die wichtigste Eigenschaft der radioaktiven Stoffe ist die Abgabe der Strahlung. Eine genauere Untersuchung zeigt, daß die von einem Radiumpräparat ausgehende Strahlung aus drei verschiedenen Teilen besteht.

Setzt man ein schmales Bündel dieser Strahlen der Einwirkung eines Magnetfeldes mit großer magnetischer Flussdichte aus, so ergibt sich das in Abb.1 schematisiert wiedergegebene Bild.

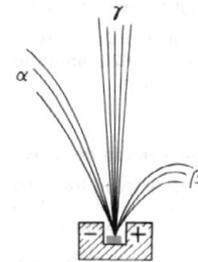


Abb.1: Das Verhalten der von einem Radiumpräparat ausgehenden Strahlen in einem Magnetfeld

- Ein Teil der Strahlen wird nur wenig abgelenkt. Aus der Ablenkungsrichtung entnimmt man, daß diese Strahlung aus positiv geladenen Teilchen bestehen muss. Man bezeichnet sie als **Alphastrahlen ( $\alpha$ -Strahlen)** und ihre Teilchen als **Alphateilchen ( $\alpha$ -Teilchen)**.

Die Geschwindigkeit mit der sie ausgesendet werden beträgt etwa 20000 km/h.  $\alpha$ -Teilchen werden schon von wenigen cm Luft oder von einem Blatt Papier absorbiert.

**Bei den Alphateilchen handelt es sich um Heliumkerne. Sie besitzen also zwei positive Elementarladungen und haben die Massenzahl 4.**

- Ein anderer Teil der Strahlen wird erheblich stärker als die Alphastrahlen abgelenkt, und zwar nach der entgegengesetzten Richtung. Man bezeichnet sie als **Betastrahlen ( $\beta$ -Strahlen)**.

Eine genauere Untersuchung zeigt, dass sie aus **Elektronen** bestehen, die mit grosser Geschwindigkeit (bis 99% der Lichtgeschwindigkeit) ausgesendet werden. Man nennt diese Teilchen auch **Betateilchen ( $\beta$ -Teilchen)**. Ihre Reichweite in Luft beträgt 30-40 cm;  $\beta$ -Teilchen können durch eine dicke Alufolie abgeschirmt werden.

**Bei den Betateilchen handelt es sich um schnell bewegte Elektronen. Sie besitzen also eine negative Elementarladung und haben nur eine sehr kleine Ruhmasse.**

- Ein dritter Teil der Strahlen wird im Magnetfeld überhaupt nicht abgelenkt. Diese Strahlen werden **Gammastrahlen ( $\gamma$ -Strahlen)** genannt. Es handelt sich um **elektromagnetische Wellen**, die die gleichen Eigenschaften wie Röntgen-Strahlen mit sehr kurzer Wellenlänge haben ( $10^{-11}$ m).

Ihr Durchdringungsvermögen ist sehr groß. Erst zentimeterdicke Bleiplatten oder massive Betonwände vermögen  $\gamma$ -Strahlen abzuweisen.

**Die Gammastrahlen sind elektromagnetische Wellenstrahlen. Sie transportieren keine elektrische Ladung und werden deshalb im Magnetfeld nicht abgelenkt.**

Die Gammastrahlen verhalten sich in vielen Fällen wie eine Teilchenstrahlung. Man spricht deshalb auch von **Gammaquanten ( $\gamma$ -Quanten)**.

Allgemein gilt:

Je kleiner die Wellenlänge einer elektromagnetischen Strahlung ist, desto stärker tritt der Teilchencharakter der Strahlung (Quanten) in Erscheinung. Deshalb wird bei der Röntgen- und der  $\gamma$ -Strahlung oft der Teilchencharakter in die Betrachtung einbezogen.

Die radioaktiven Strahlen haben die Eigenschaft, beim Durchgang durch Materie Ionenpaare (positive Ionen und negative Elektronen) zu bilden. Man spricht daher auch von **ionisierenden Strahlen**.

### 3 Gesetze des radioaktiven Zerfalls

Die bereits erwähnte Erfahrungstatsache, daß der Ablauf radioaktiver Vorgänge nicht durch äußere Einwirkungen wie Temperatur- oder Druckänderungen beeinflusst werden kann, weisen darauf hin, daß es sich bei der Radioaktivität nicht um chemische Vorgänge (d.h. um Veränderungen in der Atomhülle) handeln kann.

Es steht vielmehr fest, daß die radioaktiven Erscheinungen ihren Ursprung in den Atomkernen haben.

Die von den Radionukliden ausgestrahlten Alpha- und Betateilchen sowie die Gammastrahlen kommen aus den Atomkernen.

Der radioaktive Zerfall erfolgt spontan. Es ist unmöglich vorauszusagen wann ein bestimmter Atomkern zerfällt. Die radioaktiven Umwandlungen stellen Ereignisse dar, die den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsberechnung und der Statistik unterliegen.

Von einem bestimmten Radionuklid zerfällt in **jeder Zeiteinheit ein gleichbleibender Bruchteil** der von dem Nuklid jeweils noch verbleibenden Atome

Um diese Erscheinung quantitativ beschreiben zu können, führen wir eine neue physikalische Grösse ein, die man als **radiologische Aktivität** oder kurz als **Aktivität** bezeichnet.

Unter der radiologischen Aktivität (Formelzeichen:  $A$ ) eines Radionuklids versteht man den Quotienten aus der Anzahl der Zerfallsakte  $\Delta N$  und der Zeit  $\Delta t$ , in der diese Zerfallsakte erfolgen.

$$A = - \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

$A$ : radiologische Aktivität  
in Bq (Becquerel)  
 $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$

$\Delta N$ : Anzahl der Zerfallsakte

$\Delta t$ : Zeitintervall in s

#### Anmerkungen:

Die abgeleitete Einheit der radiologischen Aktivität ist das **Becquerel** (Einheitenzeichen: **Bq**).

Unter einem **Becquerel** versteht man die **Aktivität** eines Radionuklids, bei der ein Zerfallsakt pro Sekunde stattfindet

$\Delta N$  wird negativ gerechnet;  $A$  ist also positiv.

Die früher verwendete Einheit der radiologischen Aktivität (Curie) darf nicht mehr benutzt werden.

(1 Curie = Aktivität von 1 g Radium =  $37 \cdot 10^9$  Zerfallsakte pro Sekunde  $\implies 1 \text{ Ci} = 37 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1} = 37 \text{ GBq}$ )

Um zu einer mathematischen Formulierung des radioaktiven Zerfalls zu kommen, bezeichnen wir die Anzahl der zu einer bestimmten Zeit  $t$  vorhandener Atome eines Radionuklids mit  $N$ .

In dem folgenden Zeitintervall  $\Delta t$  sollen hiervon  $\Delta N$  Atome zerfallen. Die oben getroffene Feststellung, daß von einem bestimmten Radionuklid **in jeder Zeiteinheit ein gleichbleibender Bruchteil** der **jeweils noch vorhandenen Atome** zerfällt, läßt sich mathematisch wie folgt beschreiben:

Das negative Vorzeichen bringt zum Ausdruck, daß die Anzahl  $N$  der vorhandenen Atome im Laufe der Zeit abnimmt.

Der Proportionalitätsfaktor  $\lambda$ , der für jedes Radionuklid einen bestimmten Wert hat, wird als die **Zerfallskonstante** bezeichnet. Sie entspricht der Wahrscheinlichkeit, daß irgendein radioaktiver Atomkern in der gewählten Zeiteinheit zerfällt. Die Zerfallskonstanten sind in den Einheiten  $\text{s}^{-1}$ ,  $\text{min}^{-1}$ ,  $\text{h}^{-1}$ ,  $\text{a}^{-1}$  usw. zu messen. Bei einem bekanntem Wert von  $\lambda$  ist es möglich, mit Hilfe der angegebenen Formel zu berechnen, wieviel Atome von einer einheitlichen radioaktiven Substanzmenge in einem beliebigen Zeitintervall zerfallen.

Die **mittlere Lebensdauer**  $\tau$  eines Radionuklids ist gleich dem reziproken Wert seiner Zerfallskonstante  $\lambda$ .

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$\tau$ : mittlere Lebensdauer in s

$\lambda$ : Zerfallskonstante in  $\text{s}^{-1}$

$\Delta t$ : Zeitintervall in s



Bei den bisherigen Betrachtungen muß beachtet werden, daß sie streng genommen nur gelten, wenn die Anzahl  $N$  der vorhandenen Atomkerne während des Zeitintervalles  $\Delta t$  als konstant betrachtet werden kann. Dies bedeutet, dass die Formel umso besser gilt, je kleiner man die Zeitintervalle  $\Delta t$  wählt. Um diese Tatsache zum Ausdruck zu bringen, wird die obige Formel oft auch in der Form

$$dN = -\lambda N dt$$

geschrieben.

Um die in einer beliebig langen Zeitspanne zerfallende Zahl von Atomen zu ermitteln, müssen wir die Gleichung integrieren.

Wir bilden das Integral von der Zeit Null mit der Teilchenzahl  $N(0)$  bis zur Zeit  $t$  mit der Teilchen  $N(t)$ :

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$$

Für die hergeleitete Beziehung gilt:

Grundgesetz des radioaktiven  
Zerfalls

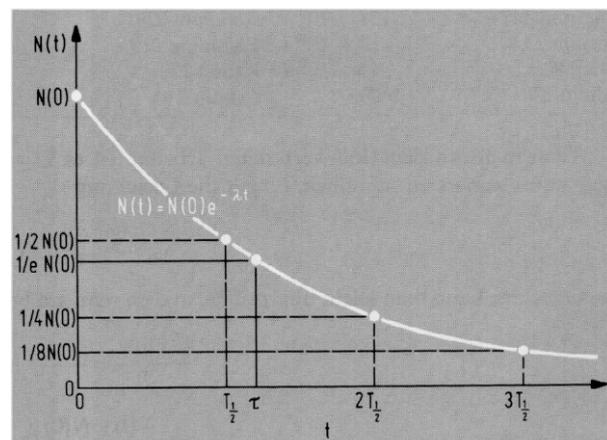
$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t}$$

$N(t)$ : Anzahl der Atomkerne zum Zeitpunkt  $t$   
 $N(0)$ : Anzahl der Atomkerne zum Zeitpunkt  $t = 0$   
 $\lambda$ : Zerfallskonstante in  $1/s$   
 $t$ : Zeit in  $s$

In Abb.2 ist das Gesetz grafisch dargestellt.

Die Werte dieser radioaktiven Zerfallskurve müssen experimentell bestimmt werden.

Abb.2: Die radioaktive  
Zerfallsreihe



Der radioaktive Zerfall kann analog für die Aktivität  $A$  und die Masse  $m$  angeschrieben werden:

$$A(t) = A(0) \cdot e^{-\lambda t}$$

$$m(t) = m(0) \cdot e^{-\lambda t}$$

Neben der Zerfallskonstante  $\lambda$  verwendet man zur Charakterisierung der Radionuklide eine andere Grösse, die man als die **Halbwertszeit** bezeichnet.

Unter der **Halbwertszeit**  $T_{1/2}$  eines Radionuklids versteht man die Zeit, in der die Hälfte einer vorliegenden Zahl von radioaktiven Atomen zerfallen ist.

Nach der Zerfallsgleichung ergibt sich:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Für  $t = T_{1/2}$ : 
$$N = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Die **Halbwertszeit** ist eine für jedes Radionuklid charakteristische, von seiner Vorgeschichte unabhängige Konstante, die das Nuklid eindeutig kennzeichnet.

Die Halbwertszeiten für die verschiedenen Radionuklide sind sehr unterschiedlich (Abb.3). Sie reichen von kleinen Bruchteilen einer Sekunde ( $10^{-7}$  s) bis zu Trillionen Jahren ( $10^{18}$  a).

Samarium 147	128·10 <sup>9</sup> a	Polonium 210	13,5 d
Thorium 232	13,9·10 <sup>9</sup> a	Radon 222	3,8 d
Uran 238	4,51·10 <sup>9</sup> a	Astatin 210	8,3 h
Radium 226	1620 a	Francium 223	22,0 min
Actinium 227	22,0 a	Polonium 212	0,3·10 <sup>-6</sup> s

Abb.3: Halbwertszeiten radioaktiver Stoffe

Die radioaktiven Umwandlungen stellen Ereignisse dar, die den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der Statistik unterliegen. Es ist unmöglich, den radioaktiven Zerfall eines einzelnen Atoms gesetzmäßig zu erfassen und den Zeitpunkt des Zerfalls vorauszusagen.

## 4 Radioaktive Zerfallsreihen

Die beim radioaktiven Zerfall auftretenden neuen Elemente sind in der Regel wieder radioaktiv, so daß sie radioaktive Zerfallsreihen oder radioaktive Familien bilden. Erst nach einer ganzen Reihe von Zerfallsprozessen entstehen schließlich stabile Endprodukte.

Eine Zerfallsreihe endet, wenn ein Nuklid entsteht, das nicht mehr radioaktiv ist.

Es existieren vier verschiedene Zerfallsreihen (Beispiel in Abb.4), von denen drei als stabiles Endprodukt Blei liefern, während bei der vierten als Endprodukt Bismut entsteht.

Abb.4: Thorium-Zerfallsreihe

Element	Symbol	Halbwertszeit $T_{1/2}$	Ausgesandtes Teilchen	(max.) Teilchenenergie in MeV			
				$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	
Thorium	$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{10}$ a		4,0	—	0,06	
Radium	$^{228}_{88}\text{Ra}(\text{MsTh}_1)$	6,7 a		$\beta$	—	0,012	—
Actinium	$^{228}_{89}\text{Ac}(\text{MsTh}_2)$	6,1 h		$\beta$	—	1,55	$\gamma$
Thorium	$^{228}_{90}\text{Th}(\text{RaTh})$	1,90 a		$\alpha$	5,42	—	0,85
Radium	$^{224}_{88}\text{Ra}(\text{ThX})$	3,64 d		$\alpha$	5,68	—	0,24
Radon	$^{220}_{86}\text{Rn}(\text{Tn})$	54,5 s		$\alpha$	6,28	—	0,54
Polonium	$^{216}_{84}\text{Po}(\text{ThA})$	0,16 s		$\alpha$	6,77	$\beta$	—
Blei	$^{212}_{82}\text{Pb}(\text{ThB})$	10,6 h		$\beta$	—	0,34	$\gamma$
Astatin	$^{216}_{85}\text{At}(\text{ThB}')$	$3 \cdot 10^{-4}$ s		$\alpha$	7,79	—	—
Bismut	$^{212}_{83}\text{Bi}(\text{ThC})$	60,5 min		$\beta$	6,09	2,27	$\gamma$
Polonium	$^{212}_{84}\text{Po}(\text{ThC}')$	$3 \cdot 10^{-7}$ s		$\alpha$	8,78	—	—
Thallium	$^{208}_{81}\text{Tl}(\text{ThC}''')$	3,1 min		$\beta$	—	1,79	2,62
Blei	$^{208}_{82}\text{Pb}(\text{ThD})$	$\infty$			—	—	—

### 4.1 Kernumwandlung beim natürlichen radioaktiven Zerfall

Durch Betrachtung der Zerfallsreihen lassen sich nachfolgende Gesetze ableiten:

1. Bei der **Aussendung eines Alphateilchens** entsteht ein neuer Atomkern, der **eine um 2 verkleinerte Kernladungszahl** und eine **um 4 verkleinerte Massenzahl** besitzt.
2. Bei der **Aussendung eines Betateilchens** entsteht ein neuer Atomkern mit **einer um 1 größeren Kernladungszahl** und einer gegenüber dem Ausgangskern unveränderten Massenzahl.
3. Die **Abgabe eines Gammaquants** aus dem Atomkern verändert nur dessen **Energiezustand**, nicht dagegen die Art des Atomkerns.

- Allgemeines:

Ein Radionuklid strahlt beim natürlichen radioaktiven Zerfall entweder ein  $\alpha$ -Teilchen oder ein  $\beta$ -Teilchen aus, nie beide zugleich. Werden bei einem radioaktiven Präparat beide Strahlenarten beobachtet, so handelt es sich in der Regel um eine Mischung von  $\alpha$ - und  $\beta$ -strahlenden Elementen.

Ausnahmsweise können auch verschiedene Atome des gleichen Isotops  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlen aussenden.

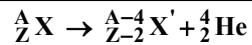
$\gamma$ -Strahlen werden als Begleiterscheinung sowohl beim  $\alpha$ -Zerfall als auch beim  $\beta$ -Zerfall beobachtet.

Da die ausgesandten Teilchen selbst Masse besitzen, nimmt die Masse zerfallender Kerne laufend ab. Bei diesen Betrachtungen kann die Masse des Elektrons wegen ihres geringen Betrages ausser Betracht bleiben, während die Masse des  $\alpha$ -Teilchens (Helium-Kern) erheblich ins Gewicht fällt. Die ausgesandten Teilchen führen aber auch Ladungen aus dem Atomkern weg.

- Bei der Aussendung eines  $\alpha$ -Teilchens ( $\alpha$ -Zerfall) erniedrigt sich die Kernladung und damit die Ordnungszahl des zerfallenden Kerns um 2 Einheiten, während die Massenzahl um 4 Einheiten abnimmt.

**Erster Verschiebungssatz:**

Wenn ein Radionuklid ein  $\alpha$ -Teilchen aussendet, entsteht ein Isotop des Elementes, das im Periodensystem der Elemente zwei Stellen weiter links als das Ausgangselement liegt.

**Beispiel:**

- Bei der Aussendung eines  $\beta$ -Teilchens ( $\beta$ -Zerfall) wandelt sich zunächst im Kern **ein Neutron in ein Proton und ein Elektron** um. Das Elektron verlässt als schneller  $\beta$ -Strahl den zerfallenden Atomkern. Der Kern besitzt also nach der Umwandlung ein Proton mehr dafür aber ein Neutron weniger; die Massenzahl hat sich demnach nicht geändert, jedoch ist die Kernladungszahl und damit die Ordnungszahl um eine Einheit grösser geworden.

**Zweiter Verschiebungssatz:**

Wenn ein Radionuklid ein  $\beta$ -Teilchen aussendet, entsteht ein Isotop des Elementes, das im Periodensystem der Elemente eine Stelle weiter rechts als das Ausgangselement liegt.

**Beispiel:**

- Mit der Aussendung von  $\alpha$ -Teilchen oder  $\beta$ -Teilchen ist in fast allen Fällen eine intensive  $\gamma$ -Strahlung verbunden. Diese übernimmt einen wesentlichen Teil der beim Zerfallsprozess freiwerdenden Energie. Bei ihr ändert sich jedoch weder die Ordnungs- noch die Massenzahl des strahlenden Elements.

## 4.2 Radioaktive Strahlung und Wärmeenergie

Die beim radioaktiven Zerfall auftretenden neuen Elemente sind in der Regel wieder radioaktiv, so dass sie radioaktive Zerfallsreihen oder radioaktive Familien bilden.

Bei allen radioaktiven Vorgängen werden verhältnismässig grosse Energiemengen frei.

Da die radioaktiven Stoffe im Allgemeinen jedoch nur in geringen Mengen zur Verfügung stehen und da die Energieabgabe über einen grossen Zeitraum verteilt ist, ist die Grösse der frei werdenden Energie im Beobachtungszeitraum sehr gering.

**Beispiel:**

Wir gehen von 2 g Radium aus. Nach 1620 Jahren ist davon 1 g zerfallen. Dabei wird die Energie von rund 10 Milliarden Joule abgegeben. Die entstehenden Radonotope geben ihrerseits beim weiteren Zerfall auch wieder Energie ab und das gleiche geschieht bei allen weiteren Zerfallsstufen bis zum Blei.

Insgesamt ergibt sich: Bei der radioaktiven Umwandlung von 1 g Radium in das stabile Endnuklid Blei wird insgesamt die Energie  $W \approx 1,4 \cdot 10^{10}$  J frei.

Diese Energie ist rund 500'000mal so gross wie die bei der Verbrennung einer gleich grossen Menge Steinkohle freiwerdende Energie.





Une publicité pour une laine traitée au radium.

Abb.5: Nützliche Wärmeentwicklung!

## 5 Verwendung radioaktiver Isotope

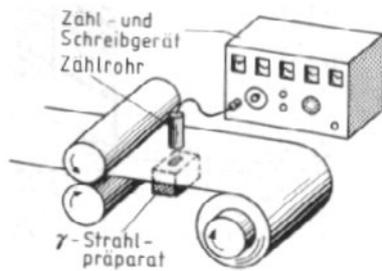


Abb.6: Belichtung einer Photoplatte

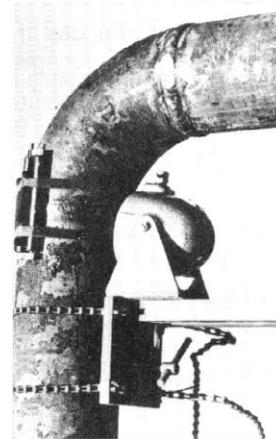


Abb.7: Dickenmessung

## 6 Aufgaben zur Kernphysik

### Aufgabe 1:

Die Aktivität einer radioaktiven Substanz sinkt innerhalb zweier Tage von  $4 \cdot 10^7$  Bq auf  $2,4 \cdot 10^7$  Bq ab. Wie hoch ist die Aktivität nach weiteren 8 Tagen?

### Aufgabe 2:

Innerhalb welcher Zeit klingt die Aktivität des Radionatriums  $^{24}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 14,8$  h) auf  $1/10$  des Anfangswertes ab?

### Aufgabe 3:

Wie groß ist die Halbwertszeit eines Nuklids, wenn seine Aktivität innerhalb einer bestimmten Zeit auf  $9/10$  und nach weiteren 5 h auf  $7/10$  des Anfangswertes abnimmt?

### Aufgabe 4:

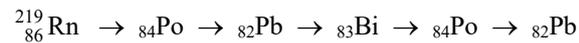
Die Erfahrung zeigt daß die Masse  $m = 0,1$  g Uran 238 in einer Sekunde rund 1240 Alphateilchen aussendet. Welche Werte ergeben sich für die Zerfallskonstante, die Halbwertszeit und die mittlere Lebensdauer?

### Aufgabe 5:

Wieviel Atome sind von der Ausgangsmasse 1 kg Radium Ra-226 nach 100 000 a noch übrig, wenn die Zerfallskonstante  $1,38 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$  beträgt?

### Aufgabe 6:

Innerhalb einer radioaktiven Zerfallsreihe treten folgende Prozesse auf:



Bestimme jeweils die Art der emittierten Strahlung und gib die Massenzahl der einzelnen Isotope an.

### Aufgabe 7:

Bei der Thorium-Zerfallsreihe unterliegt das Thorium-Isotop  $^{232}_{90}\text{Th}$  nacheinander folgenden Zerfällen:

1  $\alpha$ -Zerfall, 2  $\beta$ -Zerfällen, 4  $\alpha$ -Zerfällen, 2  $\beta$ -Zerfällen und schließlich 1  $\alpha$ -Zerfall.

Bestimme unter Verwendung eines PSE das stabile Isotop, das am Ende dieser Zerfallsreihe steht.

### **Zusatzinformation:**

Avogadro-Zahl:  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  Teilchen/mol



## B Kernenergie

### 1 Physikalische Grundlagen

#### 1.1 Maßeinheiten der Atomphysik

Da die üblichen Einheiten für Masse und Energie in der Atom- und Kernphysik zu groß sind, benutzt man hier üblicherweise andere Einheiten.

##### Masse:

Massen gibt man in der atomaren Masseneinheit u an. Dabei legt man fest, dass 1 u der 12. Teil der Masse eines  $^{12}\text{C}$ -Nuklids ist. Es gilt die Umrechnung

$$1\text{u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Damit ist 1 u etwa die Masse eines Nukleons.

Man kann die Massen im atomaren Bereich heutzutage sehr genau bestimmen. Für die Teilchen Elektron, Proton und Neutron wurden gemessen:

$$m_e = 0,000549 \cdot \text{u},$$

$$m_p = 1,007276 \cdot \text{u},$$

$$m_n = 1,008665 \cdot \text{u}$$

##### Energien:

Energien werden in eV (Elektronenvolt) angegeben:

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

#### 1.2 Massendefekt

Betrachtet man einen Heliumkern  $^4_2\text{He}$ , der aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, so sollte man erwarten, daß seine Masse

$$m = 2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n = 2 \cdot 1,007276 \cdot \text{u} + 2 \cdot 1,008665 \cdot \text{u}$$

$$m = 4,031882 \cdot \text{u}$$

beträgt.

Tatsächlich mißt man aber eine Nuklidmasse des He von nur

$$m(^4_2\text{He}) = 4,001506 \cdot \text{u}.$$

Es besteht also die Massendifferenz  $\Delta m = 4,031882 \cdot \text{u} - 4,001506 \cdot \text{u} = 0,030376 \cdot \text{u}$ . Eine Massendifferenz stellt man bei allen Kernen fest. Allgemein läßt sich festhalten:

Die Masse eines Nuklids ist stets kleiner als die Summe der Massen seiner Nukleonen.  
Diese Differenz bezeichnet man als **Massendefekt**  $\Delta m$ .

Der Massendefekt berechnet sich gemäß:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m \quad \text{Dabei bezeichnet } m \text{ die tatsächliche Masse des Kerns.}$$

##### Äquivalenz von Masse und Energie:

Eine Deutung des Massendefekts gelingt mit der berühmten Formel von A. Einstein <sup>1)</sup>, die er 1905 im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie entwickelte:

Formel Einsteins: Äquivalenz  
von Masse und Energie

$$E = m \cdot c^2$$

E: Energie in J

m: Masse in kg

c: Lichtgeschwindigkeit im Vakuum in m/s,

$$c = 299793 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

<sup>1)</sup> Albert EINSTEIN (1879-1955), deutscher Physiker, Relativitätstheorie



Diese Formel besagt, daß Masse und Energie zwei einander äquivalente Größen sind.  $c^2$  spielt in der Formel nur die Rolle einer Proportionalitätskonstanten.

Um zu sehen, welche **Energiemenge 1 g Masse** entspricht, wird nach der Formel von Einstein folgende Umrechnung durchgeführt:

$$E = m \cdot c^2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 90 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

Zur besseren Beurteilung dieser Menge erfolgt noch die Umrechnung in kWh und in t SKE:

$$E = 9 \cdot 10^{13} \text{ J} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ kWh} = \mathbf{3,1 \cdot 10^3 \text{ t SKE}}$$

In 1 g Masse steckt also die unvorstellbare Menge Energie von ca. 3000 t Steinkohle. Es existiert jedoch keine technische Möglichkeit, mit der diese Energie freigesetzt werden könnte.

Als zweites Beispiel wird noch berechnet, wie viel Energie einer atomaren Masseneinheit  $u$  entspricht:

$$E = m \cdot c^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 149 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

Schließlich wird dieser Wert noch in eV umgerechnet, man erhält:

$$\mathbf{1 u = 933 \text{ MeV}}$$

### 1.3 Bindungsenergie

Mit Hilfe der Formel von Einstein läßt sich der Massendefekt folgendermaßen deuten:

Die beim Zusammenbau eines Kerns aus seinen Nukleonen "verloren gegangene" Masse, der Massendefekt, wird als Energie freigesetzt, und zwar ist das genau die **Bindungsenergie**, mit der die Nukleonen im Kern zusammengehalten.

Umgekehrt müßte man diese Energie aufwenden, wollte man einen Kern in seine Nukleonen zerlegen.

Als Beispiel sei im Folgenden die Bindungsenergie eines Heliumkerns  ${}^4_2\text{He}$  berechnet. Bindungsenergie ist die beim Zusammenbau eines Kerns abgegebene Energie, sie müßte deshalb mit einem negativen Vorzeichen versehen werden. Zur Vereinfachung wird im Folgenden nur der Betrag der Bindungsenergie betrachtet.

Wie oben berechnet, gilt für den Massendefekt eines Heliumkerns  $\Delta m = 0,030376 \text{ u}$ . Mit dem Zusammenhang daß  $1u = 933 \text{ MeV}$  ist, erhält man für die Bindungsenergie  $E_{\text{He}} = 28,3408 \text{ MeV}$ .

Zu Vergleichszwecken ist es sinnvoll, die Bindungsenergie pro Nukleon zu bestimmen; beim He-4-Kern bedeutet dies, daß man durch 4 dividiert:

$$E_b = 7,0852 \text{ MeV}$$

So wie für den He 4-Kern dargestellt, kann man für jedes Isotop die Kernbindungsenergie pro Nukleon bestimmen. Trägt man diese Bindungsenergie gegen die Massenzahl  $A$  auf, so ergibt sich die in Abb.1 dargestellte Kurve.

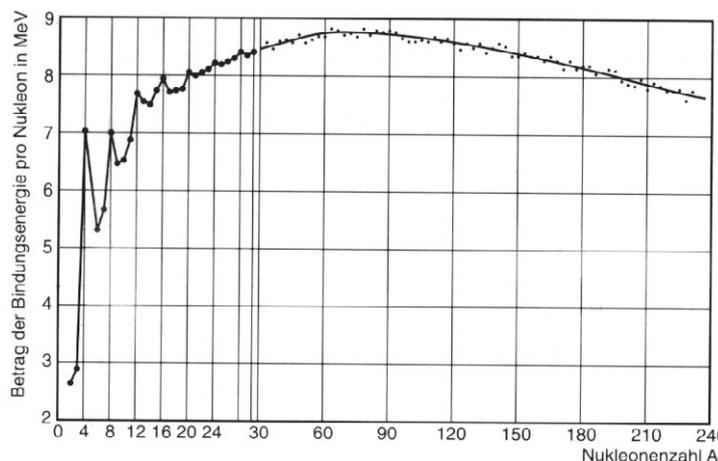


Abb.1: Bindungsenergie pro Nukleon

Man teilt die Nuklide in leichte Kerne, mittelschwere und schwere Kerne ein. Die Kurve zeigt demnach, daß die leichten Kerne, mit Ausnahme des He 4-Kerns, eine vergleichsweise niedrige Bindungsenergie aufweisen. Die mittelschweren Kerne (mit  $A \sim 80$ ) zeigen ein Maximum bei der Bindungsenergie, während die schweren Kerne wiederum eine geringere Bindungsenergie besitzen.

### Möglichkeiten zur Freisetzung von Kernbindungsenergie:

Wenn man Kernenergie freisetzen will, so muß man Kerne mit geringerer Bindungsenergie mittels Kernreaktionen in Kerne höherer Bindungsenergie umwandeln. Aus dem Verlauf der Bindungsenergiekurve ergeben sich demzufolge zwei Möglichkeiten, Kernbindungsenergie zu gewinnen:

#### **Kernspaltung**

Die Spaltung schwerer Kerne, z. B. Uran, in mittelschwere Kerne setzt die Differenz der Bindungsenergien frei. Die Kernspaltung ist Stand der Technik. Alle Kernkraftwerke, die zur Stromerzeugung eingesetzt werden, verwenden die Kernspaltung.

#### **Kernfusion**

Die Verschmelzung, auch Fusion genannt, leichter Kerne, z. B. der Wasserstoffisotope, zu etwas schwereren Kernen, insbesondere zu  ${}^4\text{He}$ -Kernen, setzt die Differenz Bindungsenergie zwischen den leichten und den etwas schwereren Kernen frei. Die He-Kerne eignen sich besonders als Fusionskerne, da sie eine vergleichsweise hohe Bindungsenergie besitzen. Fusionsreaktionen finden in der Sonne statt. Die technische Realisierung der Kernfusion befindet sich im Stadium der Erforschung, wobei noch beträchtliche wissenschaftliche und technische Probleme zu lösen sind. Ob die Kernfusion eine zukünftige Energiequelle für die Menschheit sein kann, läßt sich noch nicht abschließend beurteilen.

## 2 Kernspaltung

### 2.1 Spaltungsvorgang

Im Jahre 1938 entdeckten die Physiker Hahn und Straßmann die Kernspaltung. Beschießt man einen U 235-Kern mit einem Neutron (Abb.2), so bildet sich zunächst ein Zwischenkern, der nach Bruchteilen einer Sekunde in zwei Kerne zerplatzt. Zusätzlich werden 2 bis 3 Neutronen und Energie frei.

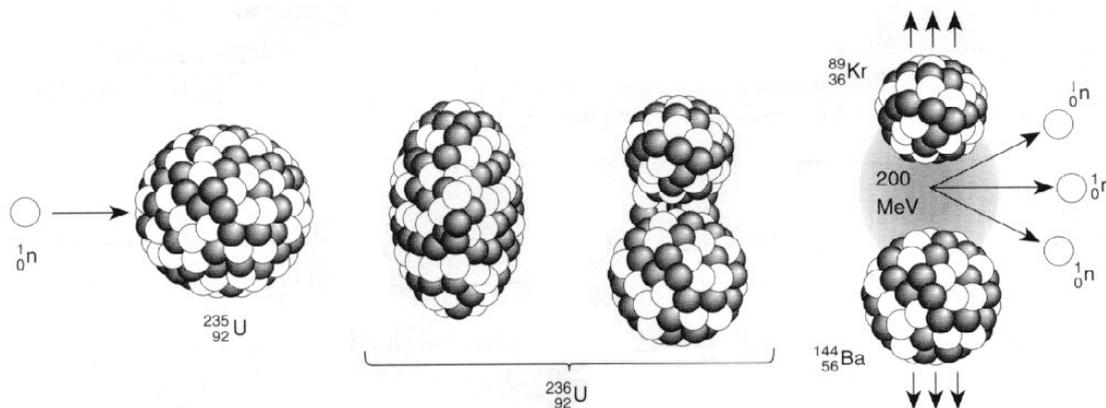
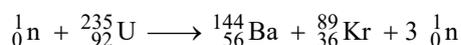


Abb.2: Spaltung eines U 235-Kernes

Die Kernreaktionsgleichung -unter Weglassung des Zwischenkerns- für die dargestellte Spaltung lautet:



Für die angegebene Reaktion wird die Massenbilanz ermittelt. Zu diesem Zweck bestimmt man die Masse  $m_1$  sämtlicher Teilchen vor der Spaltung und vergleicht sie mit der Masse  $m_2$  aller Teilchen nach der Spaltung.

Vor der Spaltung	Nach der Spaltung
$m_1 = m_n + m(\text{U235})$ $= 1,008665 \text{ u} + 234,993456 \text{ u}$	$m_2 = m(\text{Ba144}) + m(\text{Kr89}) + 3m_n$ $= 143,89195 \text{ u} + 88,89782 \text{ u} + 3 \cdot 1,008665 \text{ u}$
$m_1 = 236,00211 \text{ u}$	$m_2 = 235,81576 \text{ u}$
Massendefekt: $\Delta m = 0,023232 \text{ u}$	

Nach der Gleichung von Einstein entspricht dieser Masse eine Energie von ca. E= 200 MeV.

Das ist die pro gespaltenem U 235-Kern freigesetzte Energie, deren weitaus überwiegender Teil in Form von kinetischer Energie der auseinanderfliegenden Tochterkerne auftritt. In Kernreaktoren werden diese im umliegenden Strukturmaterial abgebremst und damit die kinetische Energie in Wärme umgewandelt.

Anmerkung:

Die dargestellte Reaktion ist ein Beispiel. Welche Spaltprodukte, im Beispiel Ba und Kr, sich ergeben, ist zufallsbedingt. Statistisch entstehen zwei mittelschwere, unsymmetrische Bruchkerne, z.B. Kr 89, Sr 94 oder Y 90 und Ba 44, Cs 140 oder Xe 139.

Energiegehalt der Materie:

Die Energie, die bei der Spaltung eines U 235-Kerns freigesetzt wird, ist mit  $200 \text{ MeV} = 300 \cdot 10^{-12} \text{ J}$  energietechnisch gesehen eine sehr geringe Energiemenge. Es soll deshalb abgeschätzt werden, wie viel Energie beim **Spalten von 1 kg U 235-Kernen** frei wird.

Nach der Definition der Stoffmenge 1 mol enthalten 235 g U 235-Kerne gerade so viel Kerne, wie die Konstante von Avogadro angibt, nämlich  $6,0220 \cdot 10^{23}$  Kerne.

Demnach sind in 1kg U 235 insgesamt  $(1000\text{g}/235\text{g}) \cdot 6,0220 \cdot 10^{23} = 2,56 \cdot 10^{24}$  U 235-Nuklide vorhanden.

Da bei der Spaltung jeder Kern etwa 200 MeV Energie liefert, werden bei der Spaltung von 1 kg dieser Kerne  $200 \cdot 2,56 \cdot 10^{24} \text{ MeV} = 512 \cdot 10^{24} \text{ MeV} = 81,9 \cdot 10^{12} \text{ J}$  frei.

Dies entspricht  **$23 \cdot 10^6 \text{ kWh}$**  bzw. 2800 t SKE.

Vergleicht man die Energiedichten bei der Kernspaltung mit derjenigen der chemischen Energie der Verbrennung von Steinkohle, so zeigt sich, daß 1 kg U 235 so viel Energie liefert wie etwa 3000 t Steinkohle, das ergibt ein Verhältnis von 1 zu 3000000.

## 2.2 Kettenreaktion

Wie kann man nun eine so große Anzahl von Kernen, wie sie beispielsweise in 1 kg U 235 enthalten sind, spalten?

Bei der Spaltung eines U 235-Kerns entstehen im statistischen Mittel 2,3 freie Neutronen. Wenn diese Neutronen dazu verwendet werden, weitere U 235-Kerne zu spalten, so entsteht eine Kettenreaktion (Abb.3).

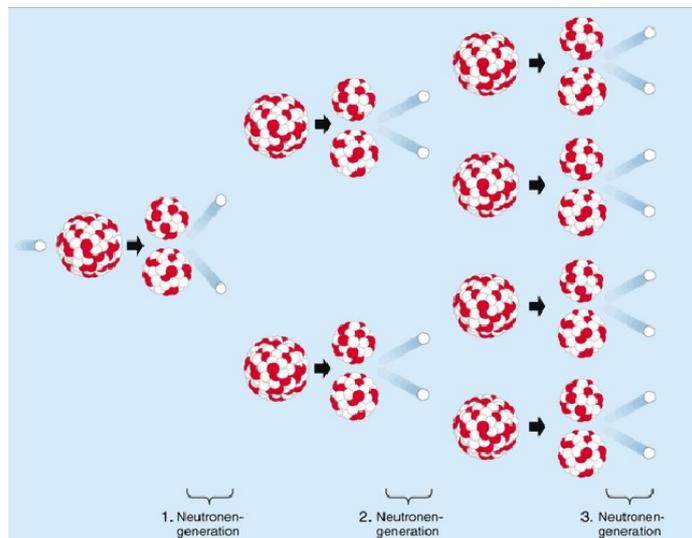


Abb.3: Kettenreaktion

Nur durch sie ist es möglich, mittels Spaltung Energie in größeren Mengen freizusetzen. Würde jedes der 2 bis 3 freiwerdenden Spaltneutronen wieder eine Spaltung verursachen, so würde die Anzahl der Spaltungen lawinenartig anwachsen. Diese unkontrollierte Kettenreaktion wird bei der Atombombe ausgenutzt.

Um die Kettenreaktion genauer zu erfassen, definiert man den **Vermehrungsfaktor**  $k$ , der angibt, um welchen Faktor sich die Anzahl der nachfolgenden Spaltungen im Vergleich zu der Anzahl der vorherigen Spaltungen (von einer Generation zur nächsten) durchschnittlich verändert:

$$k = \frac{\text{Anzahl der nachfolgenden Spaltungen}}{\text{Anzahl der vorherigen Spaltungen}}$$

Bei den Werten für den Vermehrungsfaktor sind entsprechend Abb.4 drei Fälle zu unterscheiden:

Vermehrungsfaktor	Zustand	Beispiel	Bezeichnung
$k < 1$	Anzahl der Spaltungen nimmt ab	Beim Herunterfahren eines Kernreaktors	Unterkritisch
$k = 1$	Anzahl der Spaltungen bleibt konstant	Im stationären Betrieb eines Kernreaktors	Kritisch
$k > 1$	Anzahl der Spaltungen nimmt zu	Beim Hochfahren eines Kernreaktors	Überkritisch

Abb.4: Vermehrungsfaktor

Um eine Kettenreaktion aufrechterhalten zu können, muß eine Mindestmenge (= **kritische Masse**) an Spaltstoff vorhanden sein.

Ist die kritische Masse unterschritten, so verlassen zu viele Neutronen ohne Spaltung den Spaltstoff.

Die kritische Masse kann verringert werden, wenn man den Spaltstoff mit einem **Neutronenreflektor**\*) umgibt, der die austretenden Neutronen in das Spaltmaterial zurückwirft.

## 2.3 Wechselwirkungen zwischen Neutronen und Kernen

Wenn ein Neutron einen Kern trifft, so ist nicht von vornherein gesagt, dass der Kern gespalten wird. Vielmehr gibt es drei Möglichkeiten, wie Neutron und Kern miteinander reagieren können:

Es sind dies **Streuung**, **Absorption** und **Spaltung**.

Die drei möglichen Wechselwirkungen zwischen Neutronen und Kernen, Spaltung, Streuung und Absorption, finden in einem Atomreaktor gleichzeitig statt, wenn man Kerne mit Neutronen beschießt. Entscheidend ist die Wahrscheinlichkeit, mit der die einzelnen Reaktionen eintreten.

Welche der drei Wechselwirkungen eintritt, hängt u.a. von der Stabilität des Kerns und von der kinetischen Energie des Neutrons ab. Es ist deshalb üblich, Neutronen nach ihrer kinetischen Energie und damit nach ihrer Geschwindigkeit in Gruppen (Abb.5) einzuteilen:

Bezeichnung	Kinetische Energie	Neutronengeschwindigkeit
Schnelle Neutronen	$> 0,5 \text{ MeV}$	$> 10^7 \text{ m/s}$
Mittelschnelle Neutronen	$100 \text{ eV} - 0,5 \text{ MeV}$	$10^5 \text{ m/s} \dots 10^7 \text{ m/s}$
Langsame oder thermische Neutronen	$< 100 \text{ eV}$	$< 10^5 \text{ m/s}$

Abb.5: Unterteilung der Neutronen

Die drei o.g. Reaktionen spielen bei der Energiegewinnung durch Kernspaltung eine wichtige Rolle, weswegen sie nachfolgend genauer betrachtet werden:

### 2.3.1 Spaltung

Beim Beschuß von Kernen mit Neutronen zeigt sich, daß sich Kerne mit **gerader Massenzahl** (wie z. B. U 238) nur durch **energiereiche schnelle Neutronen** spalten lassen, während die Spaltung von Kernen mit **ungerader Massenzahl** (wie z. B. U 235 oder Pu 239) auch durch **langsame Neutronen** möglich ist.

Die Spaltung eines U 235- oder Pu 239-Kerns durch thermische Neutronen ist um mehr als 1000mal wahrscheinlicher als die Spaltung eines U 238-Kerns mit schnellen Neutronen. Man kann deshalb feststellen, daß U 238-Kerne für die Spaltung ungeeignet sind.

Die Wahrscheinlichkeit für die Spaltung von U 235-Kernen nimmt aber mit zunehmender Geschwindigkeit der Spaltneutronen ab, so daß thermische Neutronen für die Spaltung von U 235 und auch Pu 239 Kernen am besten geeignet sind.

\*) Die kritische Masse von U235 liegt bei ungefähr 50 kg. Mit Neutronenreflektoren sind Werte unter 1 kg möglich.

### 2.3.2 Streuung

Unter Streuung versteht man einen **Stoßvorgang**, bei dem Neutron und Kern zusammenstoßen und Energie austauschen, selbst aber erhalten bleiben (ähnlich wie zwei aufeinandertreffende Billardkugeln). Dadurch wird das Neutron aus seiner Bahn abgelenkt und gibt Energie an den streuenden Atomkern ab, wodurch es an Geschwindigkeit verliert. Diese Abbremsung bewirkt, daß schnelle Neutronen nach einigen Stößen zu langsamen (thermischen) Neutronen werden.

Den Bremsvorgang bezeichnet man als **Moderation** und den Stoff, in dem er stattfindet, als Moderator (=Verlangsamter). Da bei der Spaltung von U 235-Kernen zunächst schnelle Neutronen frei werden, zur Spaltung aber langsame Neutronen erforderlich sind, spielt der Moderator in einem Reaktor eine zentrale Rolle. Moderatorstoffe benötigen selbst eine niedrige Massenzahl, damit die Abbremsung der Neutronen möglichst effektiv erfolgt. Folgende Stoffe erweisen sich als geeignete Moderatoren: Wasser, schweres Wasser, Beryllium und Grafit.

Schweres Wasser D<sub>2</sub>O besteht aus zwei Deuterium-Atomen und einem Sauerstoffatom.

### 2.3.3 Absorption

Unter Absorption wird das **Einfangen** des Neutrons durch den Kern verstanden, d. h. es kommt zu folgender Kernreaktion:

Der neu entstandene Kern ist radioaktiv, zumindest sendet er, da er durch das Einfangen angeregt wird,  $\gamma$ -Strahlen aus. Es gibt Stoffe, die die Neigung haben, Neutronen einzufangen. Zu ihnen gehören Lithium, Bor, Cadmium u.a. Diese Stoffe sind im Reaktorkern einerseits erwünscht, weil sie in den Regelstäben enthalten sind, mit denen man überschüssige Neutronen einfangen kann, um beispielsweise den Vermehrungsfaktor auf den Wert  $k = 1$  einregeln zu können. Andererseits entstehen während des Betriebs eines Reaktors durch die Kernspaltung zunehmend Stoffe, die Neutronen einfangen, so daß die Kettenreaktion nach einer gewissen Zeit zum Erliegen käme, wenn diese Stoffe nicht aus dem Reaktor entfernt würden. Diese Neutronenfänger werden als **Reaktorgifte** bezeichnet.

Bei der Konstruktion eines Reaktors müssen Strukturmaterialien verwendet werden, welche keine Tendenz zum Neutroneneinfang besitzen. Das gleiche gilt für den Moderator, da sonst keine Kettenreaktion möglich ist. Hinzu kommt noch, dass die Fähigkeit zum Neutroneneinfang bei manchen Stoffen ganz wesentlich von der kinetischen Energie der Neutronen abhängt, U 238 fängt bevorzugt mittelschnelle Neutronen ein. Um das zu vermeiden, müssen die bei der Spaltung freiwerdenden schnellen Neutronen möglichst rasch zu thermischen Neutronen abgebremst werden.

Schließlich werden auch sogenannte **Brutreaktionen** durch Neutroneneinfang eingeleitet. So kann beispielsweise U 238 ein schnelles Neutron absorbieren, wobei über radioaktive Umwandlungen ein spaltbares Pu 239-Kern „erbrütet“ wird. Dieser nimmt an nachfolgenden Spaltreaktionen teil.

## 3 Kernfusion

Kernbindungsenergie kann auch durch die Verschmelzung leichter Kerne gewonnen werden. Die Sonne erhält ihre immense Energie aus Fusionsreaktionen, bei denen letztlich Wasserstoffisotope zu Heliumkernen fusionieren.

Der Mensch hat sich die unkontrollierte Fusion in Form der Wasserstoffbombe bereits „zunutze“ gemacht.

Die technische Realisierung der Kernfusion befindet sich im Stadium der Erforschung, wobei noch beträchtliche wissenschaftliche und technische Probleme zu lösen sind. Man erwartet frühestens in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts erste Fusionskraftwerke.

Ob die Kernfusion eine zukünftige Energiequelle für die Menschheit sein kann, läßt sich noch nicht abschließend beurteilen.

# TP 1: Elektrochemie 2

## 1 Konzentrationskette

### 1.1 Zweck des Versuches

...

### 1.2 Versuchsdurchführung

#### Versuchsaufbau:

Eine **Konzentrationskette** besteht aus 2 **Halbzellen** mit **gleichen Metallelektroden** und **gleichen Metall-Salz-Lösungen unterschiedlicher Konzentration**, die leitend (hier über einen Stromschlüssel) verbunden sind.

Die Spannung = **Potentialdifferenz** zwischen den beiden Halbzellen wird an den Elektroden gemessen.

Nachfolgende Halbzellen werden verwendet:

Silber/Silbernitrat der Konzentrationen 0,2 mol/L; 0,02 mol/L und 0,002 mol/L und

Kupfer/Kupfersulfat der Konzentrationen 0,1 mol/L; 0,01 mol/L und 0,001 mol/L.

Hieraus ergeben sich für jedes Metall je 3 mögliche Konzentrationsketten, an denen die Spannung gemessen werden soll.

#### Aufgabe:

Zeichne den Versuchsaufbau und zeige ihn dem Lehrer.

*Abb.1: Versuchsaufbau Konzentrationskette*

#### Beobachtungen:

Trage die Ergebnisse der Versuche in nachfolgende Tabelle (Abb.2) ein.

Verwende die chemischen Symbole/Formeln zur Bezeichnung der Stoffe.

Konzentrationskette	Potentialdifferenz in Millivolt	Achte auf die Vorzeichen! Auf welcher Seite ist die höhere Konzentration?

*Abb.2: Potentialdifferenz verschiedener Konzentrationsketten*



### 1.3 Versuchsauswertung

Vergleiche die gemessenen Potentialdifferenzen. Was fällt dir auf?

Welche Elektrode wird zur Anode/Kathode? Erkläre.

Wie berechnet sich die Spannung einer Konzentrationskette?

### 1.4 Schlußfolgerung

...

### 1.5 Zusammenfassung

Spannung der **Konzentrationskette**  
des Systems



bei 25°C



$U_{\text{konz}}$  : Spannung der  
Konzentrationskette in V

$z$  : Anzahl der ausgetauschten  
Elektronen

## 2 Redoxvorgänge bei der Elektrolyse

### 2.1 Zweck des Versuches

...

### 2.2 Versuchsdurchführung

#### Versuchsaufbau:

Materialien:

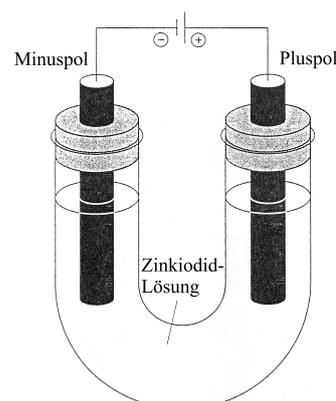
U-Rohr, 2 Graphitelektroden in Gummistopfen, Zinkiodidlösung (2,5 g/100 mL), Anschlußkabel, Stativmaterial, Gleichspannungsquelle (Netzgerät), Strom- und Spannungsmessgerät.

Das U-Rohr wird am Stativ befestigt und zu etwa 2 Drittel mit der Zinkiodidlösung befüllt.

Die beiden Elektroden werden in das U-Rohr gesteckt und mit dem Netzgerät verbunden (Abb.3).

Zusätzlich sind Strom- und Spannungsmessgerät anzuschließen.

Abb.3: Elektrolyse von Zinkiodid



#### Durchführung:

Die Spannung wird zuerst vorsichtig auf einen Wert zwischen 6 und 10 Volt hochgefahren.

Die Elektrolyse soll dann bei dieser Spannung ca. 10 Minuten ablaufen.

Anschließend wird die Spannung am Netzgerät auf Null gesetzt und das Gerät abgeschaltet.

#### Beobachtungen:

Was beobachtet ihr bei der Durchführung der Elektrolyse im U-Rohr? Wie verhalten sich die Messwerte?

Was beobachtet ihr nach Abschalten des Netzgerätes?

### 2.3 Versuchsauswertung

Zeichnet die Beobachtungen bei der Elektrolyse in den Versuchsaufbau ein.

Welche Reaktionen sind an den Elektroden abgelaufen? (in Worten und Gleichungen)

Wie hoch war die Konzentration der Lösung in mol/L?

Vergleicht die gemessenen Spannungen mit den theoretisch ( $\Delta U_{\text{ges}}$ , Gleichung von Nernst) benötigten.

Erklärt die Vorgänge nach Abschalten des Netzgerätes!

### 2.4 Schlußfolgerung

...



## TP 2: Dioden

### 1 Kennlinie einer Gleichrichterdiode

#### 1.1 Zweck des Versuches

...

#### 1.2 Versuchsdurchführung

##### Versuchsaufbau:

Die Schaltungen 1 und 2 sind nacheinander entsprechend den beiden Schaltbildern (Abb.1 und 2) aufzubauen. An den Meßgeräten sind die angegebenen Meßbereiche einzustellen.

Das Symbol einer Gleichrichterdiode ist ein Dreieck mit einem Querstrich.

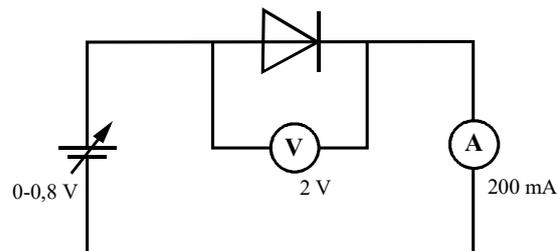


Abb.1: Schaltbild 1

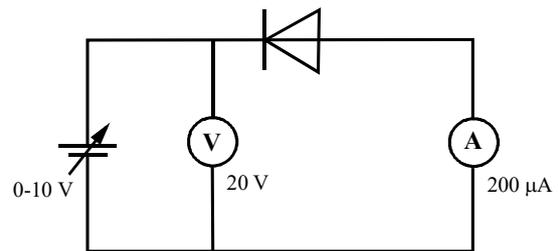


Abb.2: Schaltbild 2

##### Aufgaben:

An der Schaltung 1 wird die Spannung am Netzgerät vorsichtig in kleinen Schritten (von ungefähr 0,05 V) von 0 V bis ca. 0,8 V erhöht. Strom- und Spannungsmesswerte sind abzulesen und in einer Tabelle zu notieren.

Vorsicht: **Eine Maximalstromstärke von 180 mA darf dabei nicht überschritten werden.**

Anschließend wird an Schaltung 2 ebenso vorgegangen. Hier kann die Spannung in 1 bis 2 V-Schritten erhöht werden.

#### 1.3 Versuchsauswertung

- Trage die Messwerte in einem Strom-Spannungs-Diagramm (Strom als Funktion der Spannung) auf. Die **graphische Darstellung** ergibt die **Kennlinie** der Diode.
- Formuliere die Ergebnisse **in Worten**.
- Stelle die Kennlinie der Diode vereinfacht dar, indem du **2 Geraden durch die Messwerte** legst.
- Beschreibe die beiden vereinfachten Kennlinienabschnitte durch **mathematische Gleichungen**. Berechne den **Schnittpunkt** (siehe Mathe-Kurs ☺) der beiden Geraden.
- Vergleiche** das Ergebnis unter d) mit einer der Erkenntnisse aus Punkt b).

#### 1.4 Zusammenfassung

...

## 2 Kennlinie von Leuchtdioden (LED)

### 2.1 Zweck des Versuches

...

### 2.2 Versuchsdurchführung

#### Versuchsaufbau:

Für *mindestens* 2 unterschiedliche Leuchtdioden (gelb, rot, blau...) sind jeweils die Schaltungen 1 und 2 aus Abschnitt 1.2 (Abb.1 und 2) aufzubauen.

An den Meßgeräten sind die Meßbereiche entsprechend nachstehender Tabelle (Abb.3) einzustellen.

Das Symbol einer Gleichrichterdiode mit zwei Pfeilen stellt eine Leuchtdiode (LED) dar.

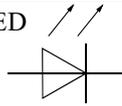
LED 	Wellenlänge in nm	Maximalstromstärke in mA	Spannungsbereich am Netzgerät in V	Messbereich am Voltmeter in V	Messbereich am Amperemeter
rot	655	20	0 bis 2	20	200 mA
grün	560	50	0 bis 3	20	200 mA
gelb	592	20	0 bis 3	20	200 mA
blau	480	50	0 bis 5	20	200 mA
farblos		50	0 bis 3	20	200 mA

Abb.3: Meßbereiche

#### Aufgaben:

An der Schaltung 1 wird die Spannung am Netzgerät vorsichtig in Schritten von ca. 0,2 V im angegebenen Spannungsbereich erhöht. **Die Maximalstromstärke darf dabei nicht überschritten werden.**

Strom- und Spannungsmeßwerte sind abzulesen und in Tabellen zu notieren.

In der sogenannten Sperrichtung wird ebenso vorgegangen, hier kann jedoch die Spannung in Schritten von ungefähr 1 V erhöht werden.

### 2.3 Versuchsauswertung

Zeichne die **Kennlinien** der Leuchtdioden.

Formuliere die Ergebnisse **in Worten**.

Beschreibe die Kennlinien durch **mathematische Gleichungen** und **Kenngrößen** der entsprechenden mathematischen Funktionen.

**Vergleiche** diese Kenngröße(n) bei den einzelnen Leuchtdioden und der Diode aus Teil 1. Welche **Bedeutung** hat diese Kenngröße? (Betrachte die Bezeichnung der Achsen und berücksichtige ein einfaches Gesetz der Elektrizitätslehre).

## 2.4 Planck-Konstante

Bei der Lichtemission gehen Elektronen des Diodenmaterials von einem höheren Energieniveau zu einem tieferen über (Modellvorstellung). Die Energie wird in Form von Photonen der Energie  $e \cdot U_S$  abgegeben.

### Aufgabe:

Berechne mit Hilfe der bekannten Wellenlängen für jede Diode den Zahlenwert für die **Planck-Konstante**.

Das Vergleichen der gemessenen Werte mit den wahren Werten gehört ebenso zu einer Auswertung wie eine Fehleranalyse.

**Hinweis:** Das Licht stammt von Elektronen, die sich „bewegen“. Geh beim Berechnen der Lichtenergie von der Mindestspannung  $U_S$  aus, bei der die Diode leuchtet.

Der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge ist nachzulesen.

Der Zahlenwert für die Elementarladung  $e$  muß nachgelesen werden.

## 2.5 Zusammenfassung

...

## 3 Schaltung mit Dioden

### 3.1 Zweck des Versuches

...

### 3.2 Versuchsdurchführung

Die dargestellte Schaltung (Abb.4) soll mit 12 V-Birnen aufgebaut werden.

Bei den vier möglichen Schalterkombinationen ist zu beobachten was passiert. Die Ergebnisse sind zu notieren.

Zum besseren Verständnis können zusätzlich die Meßgeräte verwendet werden.

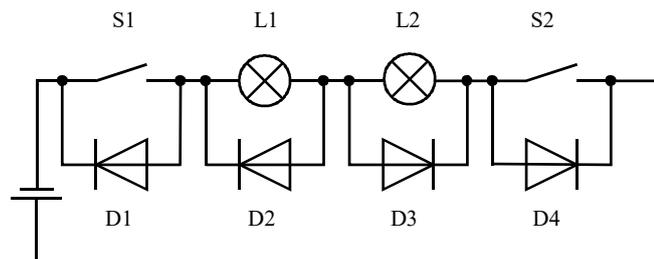


Abb.4: Schaltplan

### 3.3 Versuchsauswertung

Fasse die **Ergebnisse** zusammen und **erkläre** das Verhalten der Birnen.

## 4 Logische Schaltungen

### 4.1 Zweck der Versuche

...

### 4.2 Versuchsdurchführung

Für nachfolgende Schaltung (Abb.5) sind nacheinander verschiedene Spannungen entsprechend der Tabelle (Abb.6) an die Messpunkte A und B anzulegen

Verwende zwei „Buchsen-Leisten“ und überprüfe die Spannung, die das Netzgerät anzeigt.

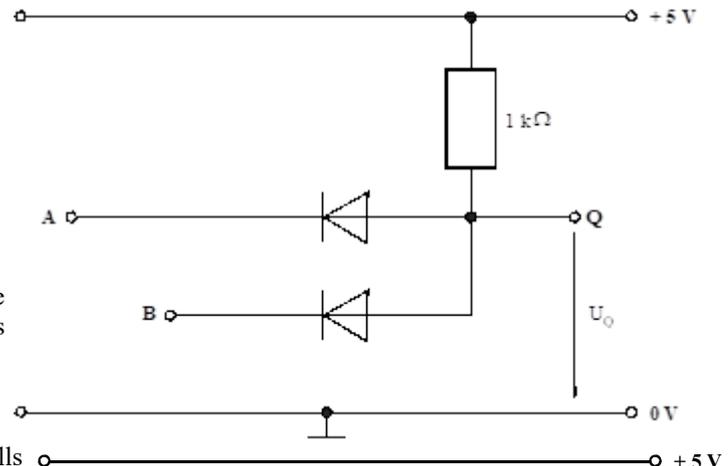
Die Spannungsdifferenz zwischen dem Messpunkt Q und der Masse soll gemessen und in der Tabelle notiert werden.

$U_A$	$U_B$	$U_Q$
0 V	0 V	
5 V	0 V	
0 V	5 V	
5 V	5 V	

Abb.6: Spannungswerte

Überprüfe die am Netzgerät eingestellte Spannung und korrigiere gegebenenfalls den in der Tabelle angegebenen Sollwert.

Abb.5: Schaltplan



Für die Schaltung (Abb.7) sind ebenfalls nacheinander verschiedene Spannungen entsprechend der Tabelle (Abb.8) an die Meßpunkte A und B anzulegen.

Die Spannungsdifferenz zwischen dem Meßpunkt Q und der Masse soll wiederum gemessen und in der Tabelle notiert werden.

$U_A$	$U_B$	$U_Q$
0 V	0 V	
5 V	0 V	
0 V	5 V	
5 V	5 V	

Abb.8: Spannungswerte

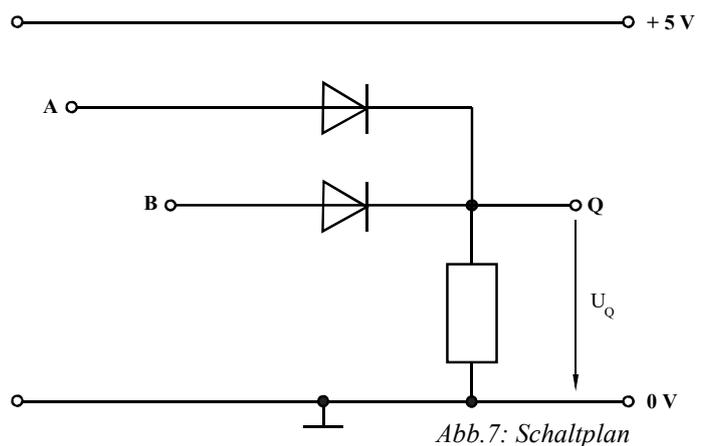


Abb.7: Schaltplan

### 4.3 Versuchsauswertung

**Bezeichne** beide logische Schaltungen und **formuliere** die jeweilige **Funktionsweise** in Worten.

**Erkläre** die gemessenen Spannungen.

### 4.4 Zusammenfassung

Bezeichnungen und Symbole (Abb.9 und Abb.10) der beiden logischen Verknüpfungen, die mit Dioden in der Digitaltechnik für Schalter verwendet werden:

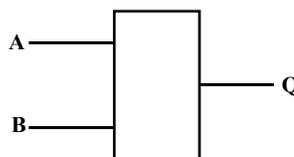


Abb.9: -Gatter

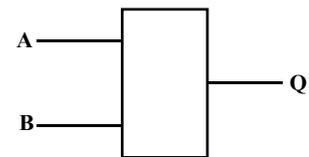


Abb.10: -Gatter

## TP 3: Brechungsgesetz

### Zweck des Versuches:

...

### Aufgabenstellung:

a) Ein Triathlet braucht für einen 10-km-Lauf 35 Minuten. Er schwimmt 2 km in 40 Minuten. Der Athlet steht 100 m vom Wasser entfernt an einem 500 m langen Strand. Die Startkoordinaten sind somit (0,100). Das Ziel liegt im Wasser und hat die Koordinaten (500, -100), wobei die positive Ordinate das Land und die negative Ordinate das Wasser darstellen.

*Wie kommt der Athlet am schnellsten vom Start zum Ziel? (Genauigkeit des Ergebnisses in Zentimeter)*

#### **Lösungshinweise:**

Berechne in einer Excel-Tabelle die Gesamtzeit, indem du schrittweise die Position X -an der der Läufer ins Wasser geht- veränderst, bis du der Lösung annäherst. Verkleinere dann die Schrittweite, damit die Lösungswerte mit hoher Genauigkeit berechnet werden.

b) Sieh zusätzlich Kolonnen vor, in denen du folgende Werte berechnest:

$\alpha_L$  (Winkel zwischen der „Vertikalen“ (Parallele zur Ordinate durch X) und der Laufstrecke)

$\alpha_S$  (... Schwimmstrecke)

$\sin \alpha_L \cdot v_S$  ( $v_S$ : Geschwindigkeit beim Schwimmen)

$\sin \alpha_S \cdot v_L$

Betrachte die Zahlenwerte der beiden letzten Kolonnen.

*Was fällt dir auf?*

c) Wellen (z.B. Lichtwellen) haben unterschiedliche Geschwindigkeiten in verschiedenen Medien (z.B. Luft und Wasser).

*Wie verhalten sich Ein- und Austrittswinkel einer Welle, die von einem Medium in ein anderes trifft?*

### Versuchsauswertung:

...

(Unter anderem sind eine detaillierte Skizze der Aufgabenstellung anzufertigen und ein Auszug der Excel-Tabelle, in dem die Lösung zu sehen ist, beizufügen.)

Für jede Kolonne/jedes Feld ist die verwendete Berechnungsformel anzugeben – entweder über Eingabe am PC oder einfach von Hand dazu geschrieben.)

### Zusammenfassung:

...

### Schlußfolgerung:

(Brechungsgesetz mit Skizze)





## TP 4: Linienspektren und Atomhüllen

### Zweck der Versuche:

...

### Versuchsaufbau:

Schickt man das Licht durch einen Spalt und anschließend durch ein Glasprisma, so wird das weiße Licht in seine Farbkomponenten zerlegt: man erhält ein kontinuierliches Spektrum.

Ein Spektroskop enthält einen solchen Spalt und ein Glasprisma.

In Abb.1 ist der schematische Aufbau des Taschenspektroskops dargestellt, das für die Messungen verwendet wird.

Der Spalt muß soweit verkleinert werden, daß das Spektrum einerseits scharf abgebildet wird, andererseits die Helligkeit noch zur guten Betrachtung ausreicht. Eventuell muß die Schärfe nachgestellt werden.

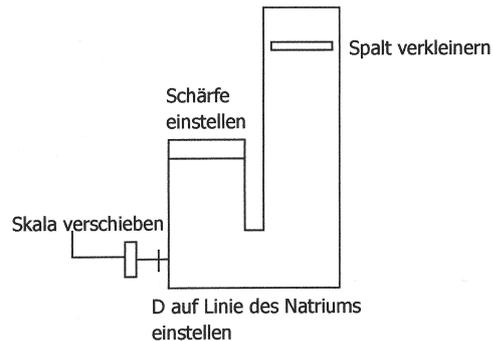


Abb.1: Taschenspektroskop

### Aufgabe 1:

Schau mit dem Spektroskop gegen den hellen Himmel (nicht direkt in die Sonne). Notiere deine Beobachtungen!

### Aufgabe 2:

- Betrachte zunächst das Spektrum der Natriumlampe. Die Spektrallinie muß mit der Markierung D (590 nm) übereinstimmen, ansonsten muß die Skala verschoben werden.
- Betrachte das Licht der Deckenleuchte.
- Betrachte die Farbe und das Spektrum verschiedener Leuchtstoffröhren (= Spektrallampen). Zeichne die Spektren in die nachfolgenden Skalen (Abb.2 und 3) ein, markiere zusätzlich den Zahlenwert und die Farbe.

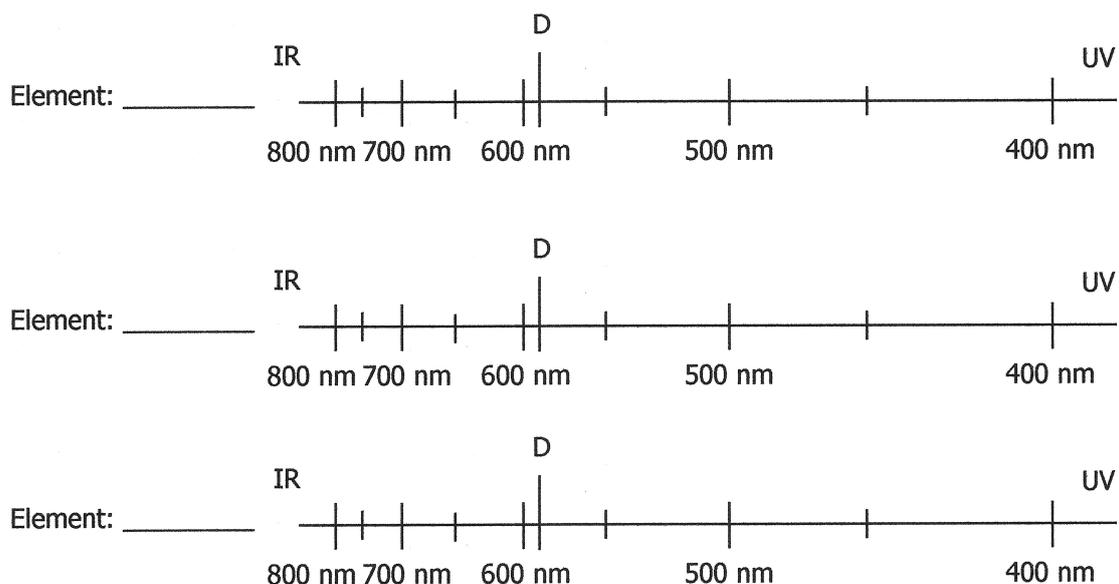


Abb.2: Linienspektren verschiedener Lichtquellen



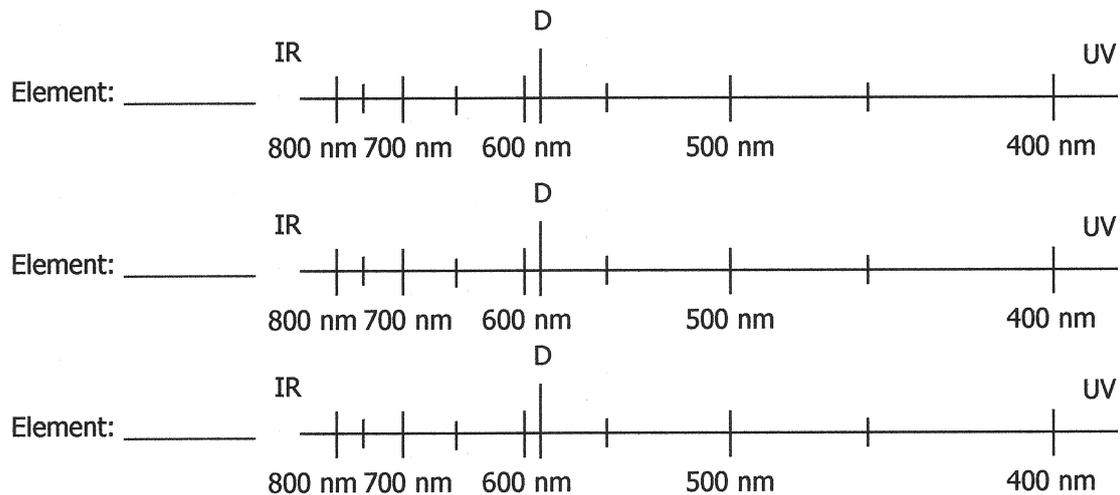


Abb.3: Linienspektren verschiedener Lichtquellen

| Was fällt dir auf, wenn du alle Spektren miteinander vergleichst?

**Aufgabe 3:**

Untersuche ein unbekanntes Salz.

Befeuchte das Salz mit etwas Wasser so daß es an einem Magnesiastäbchen haften bleibt. Halte das Magnesiastäbchen mit dem Salz in die Gasbrennerflamme. Betrachte das Linienspektrum mit dem Spektroskop und zeichne das Linienspektrum (Abb.4) ein.

Vergleiche das Spektrum mit den bei den Dampfampfen erhaltenen Resultaten. Um welches Salz könnte es sich handeln?

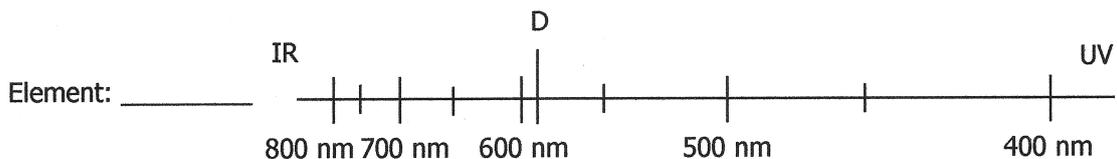


Abb.4: Linienspektrum eines Salzes

**Aufgabe 4:**

1. Betrachte Elektronen, die sich auf höheren Energieniveaus befinden. Berechne am PC **die freigewordene Energie** und die **Wellenlänge der Spektrallinien**, wenn diese Elektronen auf die Energieniveaus  $n=1$ ,  $n=2$  bzw.  $n=3$  fallen. (Die Energiedifferenz wird in Form von Licht freigesetzt).

Informiere dich selbständig über diese Vorgänge. (Z.B. Kap.V, Seiten B1 bis B3 oder andernorts)

2. Markiere in der Tabelle (durch eine Bedingung), ob die Wellenlänge im sichtbaren oder unsichtbaren Bereich liegen.

3. Schreibe gegebenenfalls die Farbe dazu \*)

4. Bezeichne zu welcher Serie die Spektrallinien angehören \*)

5. Versuche die Seriengrenze zu berechnen.

\*) Anmerkung zu 3. und 4.: Die gesuchten Begriffe sind manuell in die entsprechenden Felder einzugeben.

**Angaben zu den Energieniveaus:**

1. Energiestufe (tiefstes Niveau  $n=1$ ):  $E_1 = -13,6 \text{ eV}$

$n$ . Energiestufe (höheres Niveau  $n$ ):  $E_n = E_1/n^2$

1 eV (Elektrovolt) =  $1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

**Schlußfolgerung:**

Was ergibt sich aus dem Erlernen in bezug auf den Zweck des Versuches?



## TP 5: Überlagerung von Kreiswellen

### Zweck des Versuches:

...

### Aufgabenstellung:

Von den beiden Erregern  $S_1$  und  $S_2$  (Abb.1) breiten sich Wellen mit  $\lambda = 0,9$  cm aus. Der Abstand zwischen den beiden Erregern beträgt 6 cm.

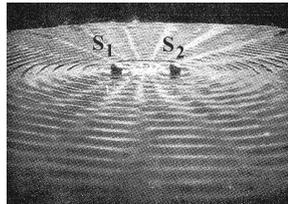


Abb.1: Interferenz von Kreiswellen

- a) Wie lautet für einen Punkt M die Bedingung, daß er in „Ruhe“ bleibt? (Mathematische Formulierung.)
- b) FAKULTATIV!! Berechne und zeichne in einem Excel-Sheet alle Punkte M, bei denen die Wasseroberfläche ruhig bleibt. Wähle hierzu  $0 \leq x_M \leq 10$ ,  $-15 \leq y_M \leq 15$  (Abb.2).

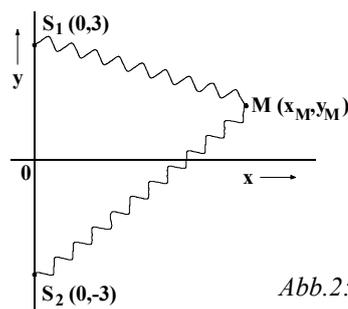


Abb.2: Berechnung

- c) Berechne die Anzahl an Linien „der Ruhe“, die zwischen den beiden Erregern liegen.

### Schlußfolgerung:

Bei der Formulierung der Schlußfolgerung solltest du folgende Fragen berücksichtigen:

- Wann bleibt die Wasseroberfläche ruhig?
- Alle Punkte die gemeinsame „Bäuche“ bilden, bezeichnet man als Bauchfransen. Welche Form haben Bauchfransen?



Abb.2: Trichterbecher mit Bauchfransen  
(Quelle: Foto Marburg/www.bildindex.de)



Abb.3: Gefäß mit Bauchfransen (Quelle: steinhartes-holstein.magix.net/website/fruehneolithikum)



## TP 6: Stehende Schallwellen und Lichtgeschwindigkeit

### 1 Schallgeschwindigkeit in Luft

#### Zweck des Versuches:

...

#### Versuchsaufbau:

Mit Hilfe eines Tonfrequenzgenerators und einem Lautsprecher werden im Kundt-Rohr (Abb.1) Schallwellen erzeugt. Diese bilden stehende Wellen, die von einer Mikrofonsonde aufgenommen und an einem Oszilloskop dargestellt werden.

Ein veränderlicher Stempel am Rohrende dient zur Abstimmung der Rohrlänge auf die Wellenlänge der stehenden Welle.

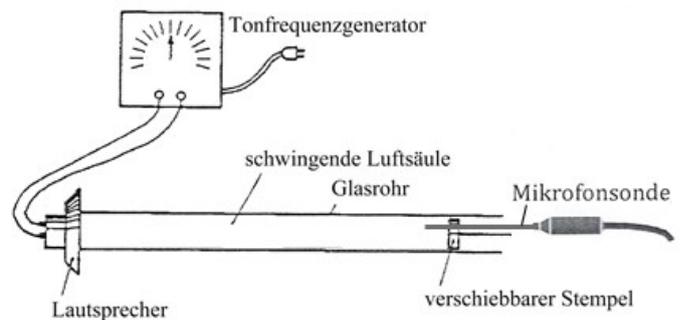


Abb.1: Versuchsaufbau Kundt-Rohr

#### Versuchsdurchführung:

- Skizziere zunächst eine Tabelle für nachfolgende Meßwerte: Frequenz, Länge der Luftsäule.
- Stelle am Tonfrequenzgenerator eine Frequenz ein, die eine stehende Welle erzeugt (am Oszilloskop zu erkennen)
- Notiere die Länge der Luftsäule.
- Verschiebe den Stempel bis wieder stehende Welle vorliegt.
- Notiere die Länge der Luftsäule.
- Wiederhole die Durchführung.
  
- Wiederhole die Messungen mit einer anderen Frequenz.
  
- Miß die Raumtemperatur.

#### Versuchsbericht:

Fertige einen Versuchsbericht an, der folgende Punkte enthält:

- Versuchsbeschreibung (u.a.: Versuchsaufbau. Was passiert im Kundt-Rohr? Weshalb bildet sich eine stehende Welle? Wo sind Bäuche/Knoten (Skizze)? Genaue Durchführung)
- Meßwerte und Beobachtungen
- Auswertung (Berechnungen, Ergebnis)
- Fehleranalyse (u.a. Fehlerquellen, Größenordnung der Abweichungen)
- Schlußfolgerung

## Schallgeschwindigkeit in Feststoffen

### Zweck des Versuches:

...

### Versuchsaufbau:

Als Schallquelle dient ein Metallstab (Abb.2), der in der Mitte (P) fest eingespannt ist. Am freien Ende (F) wird eine Schwingung erzeugt. Das andere Ende (K) trägt eine Korkscheibe, die in das Kundt-Rohr hineinragt.

Die Korkscheibe überträgt die Schwingungen aus dem Stab an die Luftsäule im Kundt-Rohr.

Das Korkmehl im Rohr visualisiert die stehende Welle (Staubfiguren).

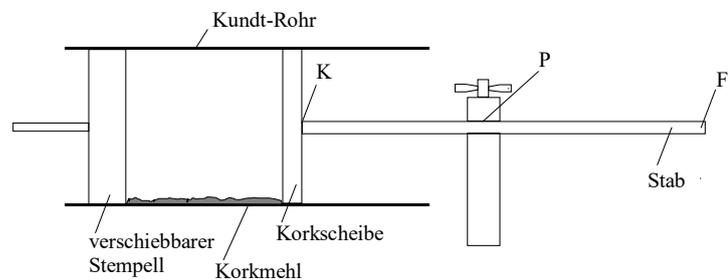


Abb.2: Versuchsaufbau Schallwellen im Feststoff

### Versuchsdurchführung:

- Mit Hilfe eines mit Spiritus angefeuchteten Lappens werden durch Reibung am freien Ende eines Messingstabes Längsschwingungen erzeugt.
- Miß den Abstand zwischen den Knoten der stehenden Welle.
- Notiere deine Meßwerte und Beobachtungen.
- Wiederhole die Messung mit zwei weiteren Stäben aus anderen Materialien.
- Miß die Länge der Stäbe.

### Versuchsbericht:

Fertige einen Versuchsbericht an, der folgende Punkte enthält:

- Versuchsbeschreibung (unter anderem: Versuchsaufbau. Was passiert im Kundt-Rohr? Weshalb bildet sich eine stehende Welle? Wo sind Bäuche/Knoten (Skizze)? Genaue Durchführung)
- Meßwerte und Beobachtungen
- Auswertung (Vorgehensweise, Berechnungen bzw. Rechenweg erläutern (falls keine Meßwerte vorliegen), Ergebnis)
- Fehleranalyse (u.a. Fehlerquellen, Größenordnung der Abweichungen)
- Schlußfolgerung

## 2 Lichtgeschwindigkeit

(Lehrerversuch)

### Zweck des Versuches:

...

...

## TP 7: Fotoeffekt

### 1 Zweck des Versuches

...

### 2 Versuchsdurchführung

#### Versuchsaufbau:

Auf einem Elektroskop befindet sich eine frisch abgeschmirgelte Zinkplatte. Die Platte wird elektrisch aufgeladen und mit Licht bestrahlt (Abb.1).

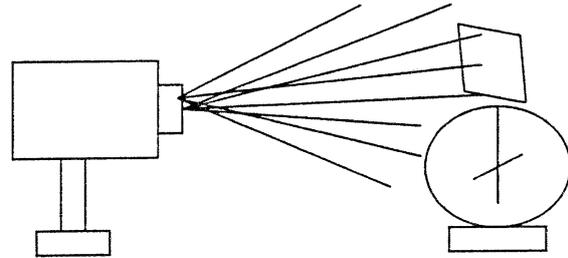


Abb.1: Versuchsaufbau Elektroskop

#### Experimente:

Versuch	Ladung	Licht	Beobachtungen
1	negativ	Lampe	
2	negativ	Hg-Lampe	
3	negativ	Lampe mit Sammellinse	
4	negativ	Hg-Lampe mit Sammellinse	
5	negativ	Hg-Lampe mit Glasscheibe	
6	negativ	Hg-Lampe, nahe dran	
7	negativ	Hg-Lampe, weit weg	
8	positiv	Lampe	
9	positiv	Hg-Lampe	

### 3 Versuchsauswertung

- Beantworte nachfolgende Fragen, die bei der Interpretation der Beobachtungen behilflich sind. Erläutere jeweils den Bezug zu den Beobachtungen.
  - Wodurch unterscheiden sich das Licht der Lampe (Strahler) und das Licht der Quecksilberlampe?
  - Wodurch unterscheidet sich das Licht auf der Platte, wenn der Abstand zur Lampe ändert?
  - Wodurch unterscheidet sich das Licht auf der Platte, wenn eine Linse verwendet wird?
  - Wie verändert sich das Licht der Quecksilberlampe, wenn es durch eine Linse tritt?
- Erkläre, wodurch der Fotoeffekt auftritt.

### 4 Zusammenfassung

...



## **TP 8: Eigenschaften des Lichtes**

### **1 Wellenlänge des Lichtes**

#### **Zweck des Versuches**

...

#### **Material**

Verschiedene Laserpointer, mehrere Strichgitter, . . . (nach Ermessen der Schüler)

Berechnungshilfe:

für  $\alpha \ll 1$  gilt:  $\sin(\arctan \alpha) \cong \alpha$  ( $\alpha$  in rad)

### **2 Spurabstand eines Datenträgers**

Bestimme den Spurabstand einer CD und einer DVD mit ähnlichen Messungen wie im 1. Teil.

#### **Hinweis:**

Die Spurrillen wirken bei diesem Versuchsteil wie ein „reflektierendes Strichgitter“.

#### **Bericht**

Der Bericht soll alle üblichen Punkte enthalten.





## TP 9: Radioaktivität

### Zweck des Versuches:

...

### Versuchsaufbau und -durchführung:

Die radioaktive Strahlung wird mit einem Geiger-Müller-Zählrohr gemessen. Sie löst im Meßgerät in unregelmäßiger Folge einzelne Impulse aus.

Somit können beispielsweise die Strahlungswerte im Klassenzimmer gemessen werden.

Radioaktive Probe mit gut messbaren Halbwertszeiten sind schwierig zu finden, sehr teuer und sehr schwierig zu entsorgen (z.B. nach knapp 10 Jahren Verwendung in einer Schule... 😞).

Die Gesetze des radioaktiven Zerfalls sollen daher mit Hilfe von Würfeln ermittelt werden!

Eine größere Menge Würfel wird hierzu gewürfelt. Alle Würfel, die eine beliebige, zuvor festgelegte Augenzahl (z.B. 6 !?) haben, werden aus der Menge entnommen.

Die Anzahl der verbleibenden Würfel wird notiert. Der Vorgang wird nun mit diesen wiederholt.

Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis „kein Zerfall“ mehr stattfinden kann bzw. statistisch nicht mehr relevant ist – d.h. bis nur noch eine Handvoll Würfel übrig ist.

### Messung der Strahlung:

Um die Strahlung quantitativ beschreiben zu können, wird die **radiologische Aktivität** oder kurz **Aktivität** verwendet:

Unter der **radiologischen Aktivität** (Formelzeichen: A) einer radioaktiven Substanz versteht man den Quotienten aus der Anzahl der Impulse N und der Zeit  $\Delta t$ , in der diese erfolgen.

$$A = \frac{N}{\Delta t}$$

A: radiologische Aktivität  
in Bq (Becquerel)  
 $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$

N: Anzahl der Impulse

$\Delta t$ : Zeitintervall in s

### Versuchsdurchführung:

- Nullrate: Bestimme die Aktivität im Klassenzimmer.
- Bestimme den „Zerfall“ der Würfel.

### Versuchsbericht:

Fertige einen Versuchsbericht an, der folgende Punkte enthält:

- Versuchsbeschreibung (u.a. Versuchsaufbau, genaue Durchführung)
- Messwerte, Erklärungen (z.B. Vorgehensweise, z.B. woher kommt die Aktivität im Klassenzimmer? , . . .) und Beobachtungen.
- Auswertung:
  - Trage dir Anzahl an Würfeln über der Anzahl an Würfelvorgängen auf. (Nimm an, dass ein Würfelvorgang einem Zeitintervall entspricht. Der Zeitpunkt 0 entspricht folglich der Gesamtzahl an Würfeln).
  - Berechne den natürlichen Logarithmus der Anzahl der Würfel und trage die Messwerte über der Anzahl an Würfelvorgängen auf.
  - Bestimme aus den zwei Diagrammen **manuell** die Halbwertszeit. Bei dem ersten Diagramm führt der Mittelwert aus beispielsweise drei „Bestimmungen“ zu einem genaueren Ergebnis. Beachte, dass der Logarithmus von  $x/2$  nicht gleich dem halben Logarithmus von  $x$  ist!
  - Berechne die absolute und die relative Abweichung der Halbwertszeit vom theoretischen Wert. (Zu berechnen oder anders zu ermitteln! 😊)
  - Bestimme die Zerfallskonstante.
- Schlussfolgerung





## TP 10: pH-Wert

### 1 Versuchsvorbereitung

#### 1.1 Herstellung von Natronlauge

Berechne die Masse an Natriumhydroxid, die zur Herstellung von 50 ml Natronlauge der Konzentration 1 mol/l erforderlich ist.

#### 1.2 Verbrennung von Schwefel

Betrachte die Verbrennungsreaktion von Schwefel. Welcher Stoff entsteht dabei? (Reaktionsgleichung und Erklärung).

Wie reagiert der so produzierte Stoff mit Wasser? (Reaktionsgleichung und Erklärung).

### 2 Versuchsdurchführung

#### 2.1 Eichen des pH-Meters

Notiere die Nummer der Kiste, in der sich das Messgerät befindet.

Bevor Messungen mit dem pH-Meter durchgeführt werden können, muß das Meßgerät **geeicht** werden. Hierzu wird entsprechend der Gebrauchsanweisung, die dem Meßgerät beiliegt, die **Zweipunkt-Kalibrierung** durchgeführt.

Die Meßsonde muß **vor und nach jedem Eintauchen** in eine Pufferlösung oder beliebig andere Lösung **in destilliertem Wasser gereinigt** werden, indem man sie darin eintaucht.

⇒ *kleine Bechergläser verwenden.*

Die Meßsonde muß solange in einer Lösung eingetaucht bleiben, bis die Meßwerte stabil sind.

#### 2.2 Messung des pH-Wertes

Von nachfolgenden Lösungen soll der pH-Wert mit dem pH-Meter bestimmt werden:

Salzsäure 0,1 mol/l

Salzsäure 0,05 mol/l (vom Schüler herzustellen)

Salzsäure 0,01 mol/l (vom Schüler herzustellen)

Essigsäure 1 mol/l

Mischung 50 % Salzsäure 0,1 mol/l und 50 % Essigsäure 1 mol/l (vom Schüler herzustellen)

Mischung 10 % Salzsäure 0,1 mol/l und 90 % Essigsäure 1 mol/l (vom Schüler herzustellen)

Zusätzlich zum pH-Meter sollen auch Universalindikatoren verwendet werden.

#### 2.3 Herstellung und Messungen mit Natronlauge

Entsprechend den durchgeführten Berechnungen sind 50 ml NaOH mit  $c = 1 \text{ mol/l}$  herzustellen.

Hierzu wird ein **Meßkolben** verwendet.



**Vorsicht:** Natriumhydroxid und Natronlauge sind **stark ätzend!**  
**Sicherheitsbrille** verwenden und Finger anschließend unter fließendem Wasser reinigen.

Von der hergestellten Lösung ist der pH-Wert mit dem pH-Meter zu bestimmen.

## 2.4 Verbrennung und Messungen mit Schwefel

Zunächst wird das Volumen eines Standzylinders bestimmt.

In diesen Standzylinder werden dann 50 ml destilliertes Wasser gefüllt.

Ein möglichst nicht oxidiertes Verbrennungslöffel wird mit ca. 0,3 g Schwefel gefüllt. Vor und nach dem Versuch sind die Massen von Löffel und (Rest-)Schwefel zu bestimmen.

Der Schwefel wird **unter der Abzugshaube** über einer Flamme erwärmt bis er brennt, dann wird der Verbrennungslöffel mit dem brennenden Schwefel in den Standzylinder gehängt.

Nach Erlöschen der Flamme wird der Verbrennungslöffel entfernt, dabei wird der Standzylinder sofort mit einer Glasplatte abgedeckt, damit nichts entweichen kann.

Dann wird durch vorsichtiges Schütteln versucht, eine Lösung herzustellen.

Abschließend wird der pH-Wert dieser Lösung mit dem pH-Meter gemessen.

## 3 Versuchsende

Nach den Messungen alle **Glasgefäß** mit **Leitungswasser spülen** und dann in der dafür vorgesehenen **Wanne sammeln**.

**pH-Sonde mit destilliertem Wasser spülen, dann die Kappe auf die Sonde stecken.**

Verschmutzte Gegenstände, die **nicht aus Glas** sind, werden **separat** daneben gesammelt.

Meßgeräte, Sicherheitsbrillen u.a. sind soweit **aufzuräumen** bzw. in die Schränke zurück zu ordnen, wie dies zu Beginn der Stunde war.

Die Tische sind zu **säubern**.

## 4 Versuchsauswertung

Von allen Messungen (außer Essigsäure und den Mischungen von Salzsäure und Essigsäure) sind neben den Meßwerten die pH-Werte durch Berechnungen zu ermitteln und mit ersteren zu vergleichen.

Berechne den theoretischen pH-Wert der Mischungen, wenn anstelle von Essigsäure reines Wasser verwendet worden wäre.

Trage alle Messwerte und berechneten Werte in ein Diagramm pH-Wert über Salzsäurekonzentration auf. Was kannst du über den pH-Wert der Mischung sagen?

Die Berechnungen zur Verbrennung von Schwefel sind auf zwei Wegen durchzuführen: einerseits unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Menge an Sauerstoff, andererseits unter Berücksichtigung der verbrauchten Menge an Schwefel. Eigene Überlegungen sollten diese Berechnungen richtig interpretieren.

## 5 Versuchsbericht

Der Versuchsbericht umfaßt die üblichen Abschnitte.