

# 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	Zweigenelbststäbe = 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



# I Mechanik

## A Statik

### 1 Grundlagen

#### 1.1 Die Aufgaben der Statik

An technischen Bauteilen greifen **Belastungskräfte** an, hervorgerufen durch Lasten, Eigengewicht, Winddruck, Gasdruck, Zahnkräfte, Riemenkräfte, Zerspanungswiderstände, Reibungswiderstände usw.

Mit den Verfahren der **Statik** werden die **Stützkkräfte** ermittelt, die den Körper im **Gleichgewicht** halten. Die Ermittlung der Stützkkräfte (Abb.1) ist der erste Schritt zur Konstruktion eines Maschinenteils. Sind alle angreifenden Kräfte bekannt, können die Abmessungen der Bauteile nach den Regeln der Festigkeitslehre festgelegt werden

Die Ergebnisse der Statik sind die Grundlage der Festigkeitsrechnung.

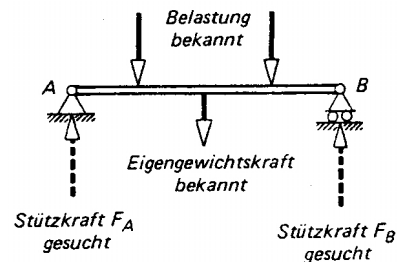


Abb.1: Belastungskräfte und Stützkkräfte

#### Beispiel:

Erst wenn alle an einer Getriebewelle angreifenden Kräfte bekannt sind, können Wellen- und Lagerdurchmesser bestimmt werden.

#### 1.2 Physikalische Größen in der Statik

Die wichtigsten Größen der Statik sind

- die **Kraft F** (Kurzzeichen F von engl. Force), die in Newton (N), Dekanewton (daN) oder Kilonewton (kN) gemessen und angegeben wird
- das **Moment M** der Kraft F (Kraftmoment), das in Newtonmeter (Nm) und Newtonmillimeter (Nmm) angegeben wird.

Das Newton (gesprochen: njuten) ist die gesetzliche und internationale Einheit für die Kraft

$$1 \text{ daN} = 10 \text{ N} \quad 1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N} = 1000 \text{ N} \\ 1 \text{ MN} = 10^6 \text{ N}$$

Bewirkt das Kraftmoment eine Drehung des Bauteils, dann nennt man es **Drehmoment M**. In der Festigkeitslehre wird ein **biegendes** Kraftmoment als **Biegemoment M<sub>b</sub>**, ein **tordierendes** (verdrehendes) Kraftmoment als **Torsionsmoment T** bezeichnet.

Hinweis zum Kapitel „Mechanik“:

Auszüge aus Alfred Böge:

Mechanik und Festigkeitslehre  
Viewegs Fachbücher der Technik  
ISBN 3-528-94010-7

### 1.3 Die Kraft F

Die **Wirkung einer Kraft** (Abb.2) lässt sich nur dann genau angeben, wenn drei Bestimmungsstücke bekannt sind:

- der **Betrag** der Kraft (z. B.  $F = 18 \text{ N}$ ),
- die **Wirklinie WL**,
- der **Richtungssinn**

- Die Kraft wird zeichnerisch durch einen Pfeil dargestellt. Die Länge des Pfeiles gibt über einen bestimmten **Kräftemaßstab** den **Betrag** der Kraft.

- Die Pfeilspitze bestimmt den **Richtungssinn**.

- Die **Wirklinie** zeigt, wo und unter welchem Winkel zu einer beliebig festgelegten Bezugsachse die Kraft wirkt.

Statt der Bezeichnung Maßstab wird auch Maßstabsfaktor verwendet.

Ist ein Körper frei beweglich, so **verschiebt ihn** eine Kraft in Richtung ihrer Wirklinie, ohne ihn zu drehen (hydraulischer Pressenstößel, Drucktaste, Flugzeug).

Eine Kraft, die auf einen Körper dieselbe Wirkung ausübt wie zwei (oder mehrere) gleichzeitig wirkende Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  nennt man die **Resultierende  $F_R$**  dieser Kräfte:

Die **Resultierende  $F_R$**  ist eine **gedachte Ersatzkraft** für mehrere Einzelkräfte.

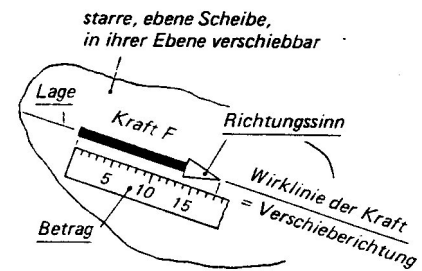
#### Übung 1:

Ermittle die Resultierende der beiden Kräfte  $F_1$  und  $F_2$ .



Man muss die Resultierende kennen, wenn man eine genaue Angabe über die Wirkung mehrerer Kräfte auf einen Körper machen will, z.B. darüber, in welche Richtung er sich verschiebt (Abb.3).

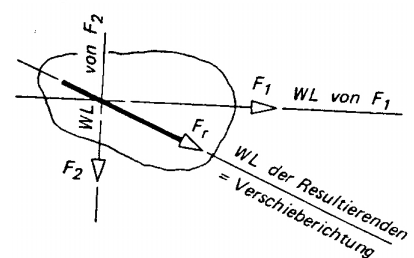
Abb.3: Resultierende mit Wirkungslinie



Lageplan  
mit eingezeichneter Kraft  $F = 18 \text{ N}$   
Kräftemaßstab  $M_K = 1 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$  ( $1 \text{ mm} \hat{=} 1 \text{ N}$ )  
Abb.2: Wirkung einer Kraft

Größen die erst durch ihren Betrag **und** ihre Richtung (Richtungssinn und Wirklinie) eindeutig bestimmt sind, heißen **Vektoren** = gerichtete Größen (z.B. Kräfte, Wege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen).

Größen bei denen zur eindeutigen Bestimmung die Angabe ihres Betrages genügt, heißen **Skalare** (nicht gerichtete Größen), z.B. Wärme, Temperatur, Masse, Arbeit, Leistung.



## 1.4 Das Drehmoment M

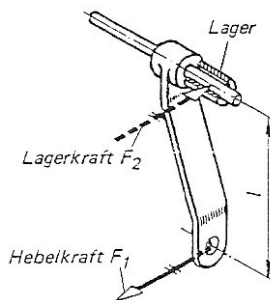
Wenn zwei gleichgroße, gegensinnige Kräfte auf parallelen Wirklinien mit dem **Wirkabstand l** (senkrecht zu den Wirklinien) wirken (Abb.4), erzeugen sie ein **Drehmoment M**. Man nennt diese zwei Kräfte ein **Kräftepaar**.

Falls der Körper frei beweglich ist, bewirkt das Kräftepaar eine Drehung auf der Stelle, ohne daß der Körper verschoben wird. Beispiele: Wellen, Tretkurbel, Handkurbel.

Man täuscht sich wenn man glaubt, daß eine Einzelkraft einen Körper dreht, wie beispielsweise die Hebelkraft in Abb. 5 vermuten läßt. Ohne das Lager wäre eine Drehung nicht möglich, man müsste die Welle mit der freien Hand abstützen. Es wird demzufolge immer ein Kräftepaar erzeugt, wobei die zweite Kraft in der Technik oft eine Lagerkraft ist.

Wie in Abb.4, 5 und 6 ersichtlich, werden die beiden Kräfte eines Kräftepaars durch kurze Schrägstriche gekennzeichnet.

Abb.5: Kräftepaar am Schalthebel



Das Drehmoment oder die Drehwirkung eines Kräftepaars kann man spüren, indem man versucht einen Fahrradlenker an seiner Drehachse zu halten (Abb.6). Die Drehwirkung wird größer, wenn die Kraft F oder der Wirkabstand l größer wird.

Abb.6: Kräftepaar am Fahrradlenker

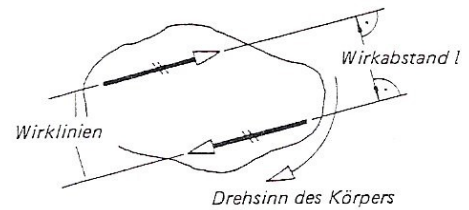
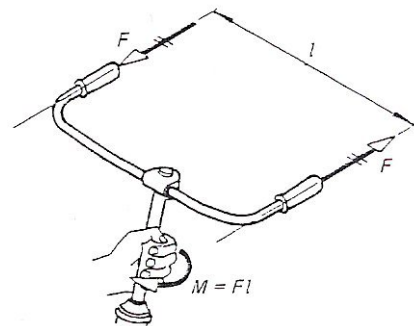


Abb.4: Kräftepaar und Drehmoment

### Übung 2:

Wie groß ist das Drehmoment der Kraft F um den Bezugspunkt D?

D



Der **Betrag M** eines Drehmoments wird als Produkt aus Kraft  $F$  und Wirkabstand  $l$  bestimmt.  
Der Wirkabstand wird senkrecht zu den Wirklinien gemessen.

$$M = F \cdot l$$

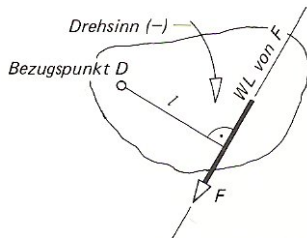
$M$ : Drehmoment in Nm

$F$ : Kraft in N

$l$ : Wirkabstand in m

Der **Drehsinn** des Drehmoments wird durch das Vorzeichen angegeben (Abb.7).  
(+) = Linksdrehsinn  $\odot$   
(-) = Rechtsdrehsinn  $\ominus$

Abb.7: Drehsinn und Vorzeichen



Als **Kräftemoment** (Abb.8) bezeichnet man das Produkt aus einer **Einzelkraft F** und ihrem **Wirkabstand l** zu einem beliebigen Bezugspunkt.

Abb.8: Kräftemoment

### Übung 3:

An der Tretkurbelwelle eines Fahrrades (Abb.9) sollen die Drehmomente  $M_1$ ,  $M_2$  und  $M_3$  in den skizzierten Stellungen berechnet werden, wobei die Kraft jeweils senkrecht zum Tretlager nach unten wirkt.

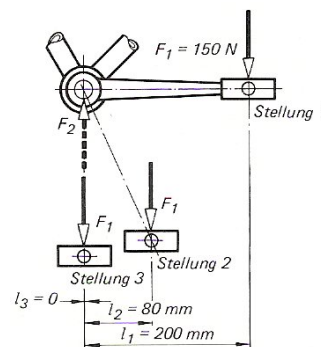


Abb.9: Tretkurbelwelle

### Lösung 3:

Als Folge der Kraft  $F_1$  entsteht im Tretkurbellager eine gleich große, entgegengesetzte Kraft  $F_2$ . Beide bilden ein Kräftepaar, das ein Drehmoment mit Rechtsdrehsinn (d.h. negativem Vorzeichen) erzeugt.

$$M_1 = -F_1 \cdot l_1 = -150 \text{ N} \cdot 0,2 \text{ m} = -30 \text{ Nm}$$

$M_2$

$M_3$

### Aufgabe 1:

Stelle das Drehmoment aus Übung 3 in Funktion der Tretkurbelstellung (math. Winkel, z.B. Stellung 1 entspricht  $0^\circ$ ) am PC dar.

Wie ändert sich das Drehmoment mit fortschreitender Kurbeldrehung?

### Aufgabe 2:

- Die Kraft  $F_1$  soll nun unter dem Winkel  $\alpha = 35^\circ$  auf die Tretkurbel (Abb.10) wirken. Wie groß ist nun das Drehmoment bei waagerechter Tretkurbelstellung?
- Das Zahnrad an der Tretkurbel hat einen Durchmesser von 150 mm. Welche Kraft muss die Kette an das hintere Zahnrad übertragen?

Lösung: a) - 17207,29 Nmm = - 17,21 Nm b) 229,43 N

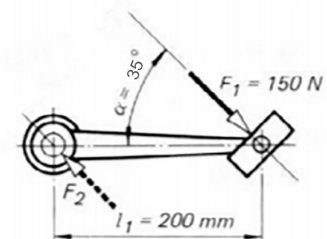


Abb.10: Tretkurbelwelle



## 2 Schwerpunktslehre

### 2.1 Schwerlinie, Schwerebene und Schwerpunkt

Wir denken uns einen ebenen Blechabschnitt in drei Teilkörper zerlegt und durch eine Symmetrieebene mit den Teilflächen  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  in zwei gleichdicke Scheiben geschnitten (Abb.11).

Auf jeden der drei Teilkörper wirkt die Erdanziehung mit den parallelen Teil-Gewichtskräften  $F_{G1}$ ,  $F_{G2}$  und  $F_{G3}$  lotrecht nach unten. Ihre Summe d.h. die Resultierende ist die Gewichtskraft des Blechabschnitts  $F_G = F_{G1} + F_{G2} + F_{G3}$ .

Die Wirklinie (WL 1) dieser Resultierenden heißt **Schwerlinie**, weil auf ihr die Gewichtskraft oder Schwerkraft des Körpers wirkt.

Drehen wir den Körper in der Symmetrieebene in eine beliebige andere Lage, so erhalten wir eine zweite Wirklinie der Gewichtskraft (WL 2), eine zweite Schwerlinie.

Der Schnittpunkt der beiden Schwerlinien ist der Angriffspunkt der Gewichtskraft  $F_G$  für jede

Körperlage und heißt **Schwerpunkt S**. Im Schwerpunkt gestützt oder aufgehängt, bleibt der Körper in jeder beliebigen Lage in Ruhe, er befindet sich somit im Gleichgewicht.

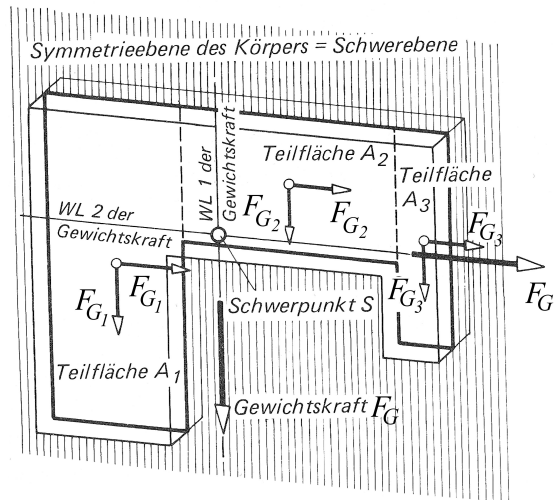


Abb.1: Schwerpunkt an Blechabschnitt

Jede durch den Schwerpunkt gehende Gerade heißt **Schwerlinie**.

Jede durch den Schwerpunkt gehende Ebene heißt **Schwerebene**.

Jede Symmetrielinie ist eine Schwerlinie, jede Symmetrieebene ist eine Schwerebene. Irgendwo auf ihnen liegt der Schwerpunkt.

Für komplizierte Körper wird die Lage des Schwerpunktes durch Versuche ermittelt. Für einfach aufgebaute Körper kann man sie mit Hilfe von Erkenntnissen aus der Statik bestimmen.

## 2.2 Gleichgewichtslagen und Standsicherheit

### 2.2.1 Gleichgewichtslagen

Die Lage des Schwerpunkts eines Körpers in Bezug auf seine Standfläche bestimmt seine Standsicherheit. Man unterscheidet folgende Gleichgewichtslagen:

#### a) Stabiles Gleichgewicht

liegt vor, wenn der *Schwerpunkt S* bei kleinster Lageänderung *gehoben* wird (Abb.2).

Hierbei entsteht immer ein **rückstellendes Kraftmoment**, das den Körper wieder in die Ausgangslage zurückführt.

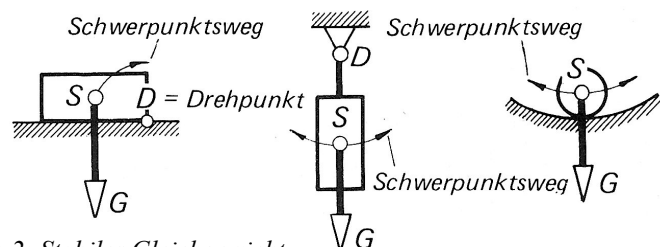


Abb.2: Stabiles Gleichgewicht

**b) Labiles Gleichgewicht**

liegt vor, wenn der *Schwerpunkt S* bei kleinster Lageänderung *gesenkt* wird (Abb.3). Hierbei entsteht immer ein **ablenkendes Kraftmoment**, das den Körper immer weiter aus der Ausgangslage herausführt.

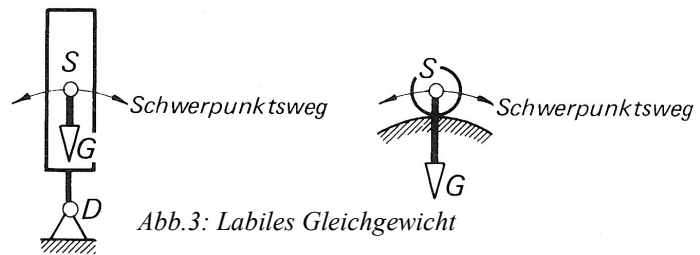


Abb.3: Labiles Gleichgewicht

**c) Indifferentes Gleichgewicht**

liegt vor, wenn der *Schwerpunkt S* bei kleinster Lageänderung *weder gehoben noch gesenkt* wird (Abb.4). Hierbei entstehen **weder rückstellende noch ablenkendes Kraftmoment**.

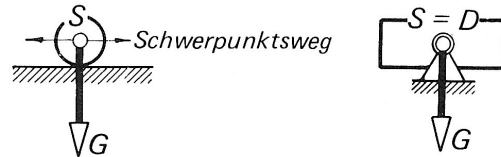


Abb.4: Indifferentes Gleichgewicht

**2.2.2 Standsicherheit**

Ein Körper, z.B. ein Auto (Abb.5) steht fest auf einer waagerechten Ebene. In der Höhe *a* über der Standfläche wirkt eine Kraft *F* waagrecht auf ihn.

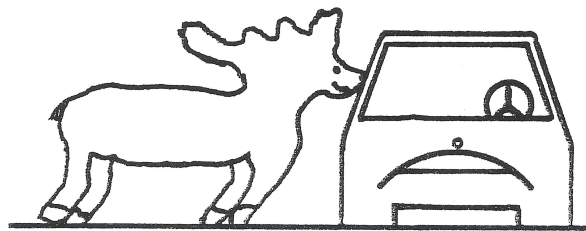


Abb.5: Standsicherheit

Wir wissen aus der Erfahrung, daß die Kraft *F* den Körper kippen kann. Er führt dann eine *Drehbewegung um die Kippkante K* als Drehmittelpunkt aus. Eine Drehung ist aber nur möglich, wenn ein Kraftmoment auf den Körper wirkt.

In Augenblick des Ankippens wirken das **Kippmoment**  $M_k = F \cdot a$ , das den Körper zu kippen versucht, und das entgegen gerichtete **Standmoment**  $M_s = F_G \cdot b$ , das den Körper in der Ruhelage zu halten sucht.

Der Körper wird nicht kippen, solange das Standmoment größer ist als das Kippmoment. Der Grad der Sicherheit gegen Kippen wird durch das Verhältnis beider Momente ausgedrückt, die Standsicherheit *S*.

Die **Standsicherheit S** wird durch das Verhältnis von Standmoment zu Kippmoment ausgedrückt.

$$S = \frac{M_s}{M_k}$$

S: Standsicherheit ohne Einheit  
 $M_s$ : Standmoment in Nm  
 $M_k$ : Kippmoment in Nm



**Zeichnerische Betrachtung:**

Betrachten wir einen Körper mit Gewichtskraft  $F_G$ , den eine Kraft  $F$  zu kippen versucht (Abb.6).

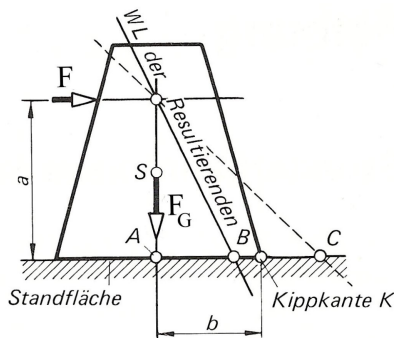


Abb.6: Standsicherheit an einem Körper

Bei der Standsicherheit  $S = 1$  geht die Resultierende  $F_R$  der beiden Kräfte durch die Kippkante  $K$ : es findet keine Drehung statt. Der Körper befindet sich gerade noch im Gleichgewicht.

Je mehr sich der Punkt  $B$  dem Punkt  $A$  nähert, um so größer ist die Standsicherheit ( $S > 1$ ). Fällt  $B$  mit  $A$  zusammen, ist die Standsicherheit unendlich groß.

Wandert der Punkt  $B$  über die Kippkante  $K$  hinaus (z.B. Punkt  $C$ ), so ist  $S < 1$  und der Körper kippt.

**2.3 Aufgaben zur Schwerpunktslehre****Aufgabe 1:**

Ein Schlepper mit angebaute Frontlader (Abb.7) hat die Gewichtskraft  $F_G = 12 \text{ kN}$ . Er soll zum Roden von Baumstümpfen eingesetzt werden. Die Abstände betragen  $l_1 = 0,94 \text{ m}$ ,  $l_2 = 1,95 \text{ m}$  und  $l_3 = 1,8 \text{ m}$ .

Welche maximale Zugkraft kann am Seil aufgebracht werden, ohne daß der Schlepper ankippt?

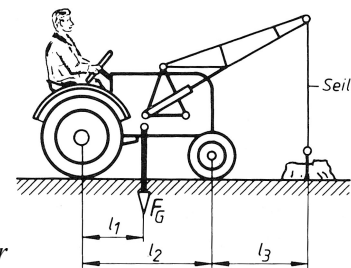


Abb.7: Schlepper

**Aufgabe 2:**

Ein Mauerstück von  $16 \text{ kN}$  Gewichtskraft soll mit Hilfe eines Seiles (Abb.8) umgekippt werden, das unter  $\alpha = 30^\circ$  an der Mauerkrone zieht. Die Abmessungen betragen  $h = 2 \text{ m}$  und  $l = 0,5 \text{ m}$ .

Gesucht: a) die zum Ankippen erforderliche Seilkraft  $F$ .

b) die erforderliche Kipparbeit bis zum Selbstkippen.

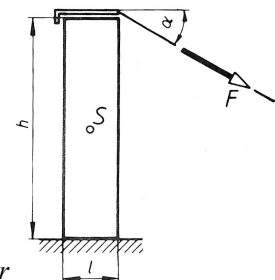


Abb.8: Mauer

**Aufgabe 3:**

Eine Kiste hat die Abmessungen  $500 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 1100 \text{ mm}$ . Ihr Schwerpunkt, in dem die Gewichtskraft von  $2 \text{ kN}$  angreift, liegt in der Kistenmitte.

a) Welche waagrecht wirkende Kraft  $F$  ist zum Ankippen der Kiste erforderlich, wenn sie an der oberen Kante der Kiste angreift. Berücksichtige alle möglichen Lagen und Kippkanten der Kiste.

b) Löse die gleiche Aufgabe in einem Excel-Sheet. Ordne die Ergebnisse nach steigender erforderlicher Kraft. Hinweis: es gibt sechs mögliche Kräfte.

### 3 Freimachen von Bauteilen (Freischneiden)

#### 3.1 Oberflächen- und Volumenkräfte

In der Statik soll gelernt werden, wie man zeichnerisch oder rechnerisch unbekannte Kräfte bestimmt, z.B. die Stützkkräfte (Lagerkräfte) die eine Getriebewelle oder einen Drehkran im Gleichgewicht halten.

Solche Aufgaben können nur dann richtig gelöst werden, wenn *alle am Bauteil angreifenden Kräfte* in die Untersuchung einbezogen worden sind.

Zwischen allen Bauteilen, die in Berührung sind (Abb.1), wirken sogenannten **Oberflächenkräfte**. Man bezeichnet sie auch als **äußere Kräfte**.

Diese denken wir uns im Mittelpunkt der Berührungsfläche A (Abb.2) angreifend.

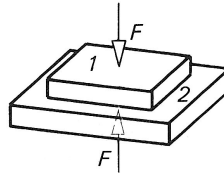


Abb.1: Oberflächenkräfte

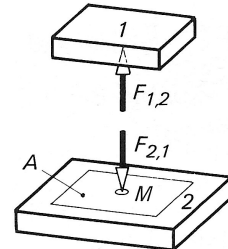


Abb.2: Angriffspunkt der Oberflächenkräfte

Tatsächlich verteilen sich die Oberflächenkräfte mehr oder weniger gleichmäßig (Abb.3) über die gesamte Berührungsfläche.

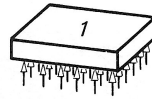
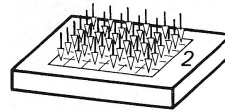


Abb.3: Tatsächliche Oberflächenkräfte



Daneben gibt es die **Volumenkräfte**, die wir uns im Massenmittelpunkt angreifend denken.

Die wichtigste und stets vorhandene Volumenkraft ist die Gewichtskraft  $F_G$  (Abb.4).

Eine weitere Volumenkraft ist magnetische Anziehungskraft.

Volumenkräfte treten immer in einem „Feld“ auf, wie beispielsweise dem Schwerfeld der Erde (Abb.5) oder einem Magnetfeld. Daher bezeichnet man Volumenkräfte auch als **Feldkräfte**.

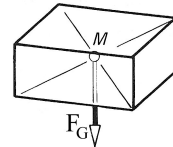


Abb.5: Angriffspunkt der Gewichtskraft

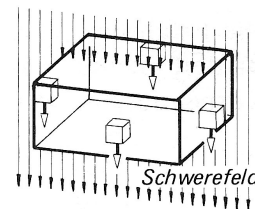


Abb.6: Feldkraft Schwerfeld

Bevor Bauteil statisch untersucht werden können, müssen alle angreifenden Kräfte erfasst werden. Dies erfolgt durch das **Freimachen** oder **Freischneiden** des Bauteils.

Beim **Freimachen** eines Bauteils werden die Nachbarbauteile, die das Bauteil berühren, eins nach dem anderen entfernt. An den **Berührungsteilen** werden die **Kräfte angebracht**, die von den weggenommenen Bauteilen auf das freigemachte Bauteil wirkten.

Beim Freimachen müssen die **Angriffspunkte**, die **Wirklinie** und der **Richtungssinn** aller Kräfte bezogen auf das freigemachte Bauteil richtig eingesetzt werden.

## 3.2 Regeln zum Freimachen (Freischneiden)

### 3.2.1 Seile, Ketten, Riemen

Aus Erfahrung weiß man, dass mit flexiblen Bauteilen wie Seilen oder Bänder keine Druckkräfte auf andere Bauteile übertragen kann.

#### Regel 1:

Seile und ähnliche flexible Bauteile können nur Zugkräfte in Seilrichtung ausüben oder aufnehmen.

Zugkräfte wirken stets vom Angriffspunkt am freigemachten Bauteil weg.

An jeder Stelle eines Seiles wirkt die gleiche Zugkraft, dies immer in Richtung des Seiles. Dies gilt auch bei der Umlenkung an einer Rolle

#### Beispiel:

Kranhaken und Seil sollen freigemacht werden

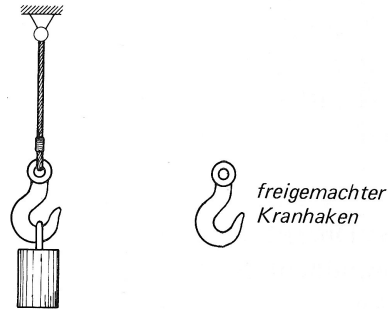


Abb.7: Freimachen bei Seilen

### 3.2.2 Zweigelenkstäbe = Pendelstützen

#### Regel 2:

Zweigelenkstäbe können Zug- oder Druckkräfte aufnehmen, deren Wirklinie die Verbindungsgerade der Gelenkpunkte ist.

Druckkräfte wirken stets auf den Angriffspunkt am freigemachten Bauteil zu.

Zweigelenkstäbe dürfen nur an zwei Punkten mit anderen Bauteilen verbunden sein. Die Form des Stabes ist beliebig: der Stab kann gerade oder gekrümmt (Abb.9) sein.

Die Kräfte sind im Gleichgewicht, wenn ihre gemeinsame Wirklinie durch die Gelenkpunkte verläuft.

#### Beispiel:

Der Zweigelenkstab (Pendelstütze), der die Plattform abstützt, soll freigemacht werden

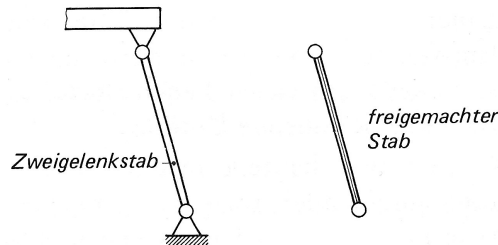


Abb.8: Freimachen von Zweigelenkstäben

Abb.9: Gekrümmter Zweigelenkstab

### 3.2.3 Berührungsflächen (ebene Stützflächen)

#### Regel 3:

**Berührungsflächen** können **Normal-** und **Tangentialkräfte** aufnehmen.

**Normalkräfte** wirken stets **auf** die **Berührungsfläche** am freigemachten Bauteil zu.

Wenn zwei Bauteile sich berühren wirkt zwischen ihnen eine Normalkraft  $F_N$  mit mit **Wirklinie senkrecht** zur Berührungsfläche (Abb.10).

#### Beispiel:

Der prismatische Körper auf einer waagerechten Ebene soll freigemacht werden.

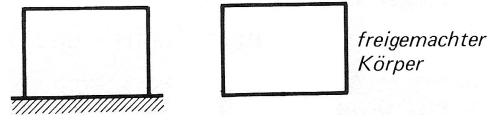


Abb.10: Freimachen einer ebenen, horizontalen Stützfläche

Zusätzlich kann eine Tangentialkraft  $F_T$  wirken (Abb.11), um das Bauteil im Gleichgewicht zu halten. Dies gilt beispielsweise **immer** bei **nicht waagerechten** Berührungsflächen (schiefe Ebenen).

Die Tangentialkraft wird durch Reibung oder Rollwiderstand hervorgerufen. Die Wirklinie liegt **in der Berührungsebene** und somit senkrecht zur Wirklinie der Normalkraft. Den **Richtungssinn** erkennt man nach Einzeichnen aller anderen Kräfte, da die Tangentialkraft der Bewegung entgegenwirkt, die die anderen Kräfte verursachen würden.

#### Beispiel:

Der prismatische Körper an einer schiefen Ebene soll freigemacht werden.

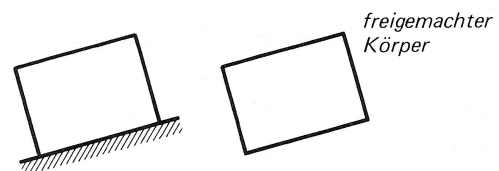


Abb.11: Freimachen einer ebenen, schiefen Stützfläche

Wenn eine **Bewegung** (z.B. Gleiten oder Abrollen) zwischen zwei Bauteilen stattfindet (Abb.12), tritt immer eine Tangentialkraft  $F_T$  auf.

Der Richtungssinn ergibt sich aus den Bewegungen: die Tangentialkraft wirkt bei dem **schnelleren Bauteil** der Bewegung **entgegen**, vergleichbar der Reibungskraft.

Das langsamere Bauteil ist häufig eine ruhende Unterlage.

Bei nicht bewegten Bauteilen, bei denen eine äußere Kraft versucht sie zu verschieben, tritt ebenfalls eine Tangentialkraft auf.

#### Beispiel:

Der bewegte prismatische Körper und die Unterlage sollen freigemacht werden.

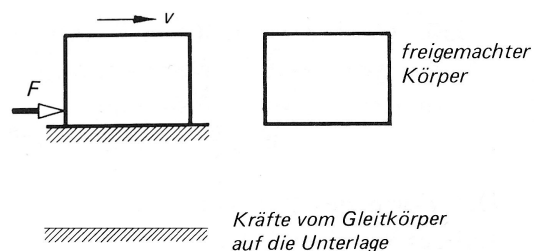


Abb.12: Freimachen an ebenen, bewegten Stützflächen

### 3.2.4 Rollkörper (gewölbte Stützflächen)

#### Regel 4:

**Rollkörper** können **Radial-** und **Tangentialkräfte** aufnehmen.

Die **Radialkräfte** wirken stets auf den Berührungspunkt am freigemachten **Bauteil** zu.

Zwischen einem **ruhenden** Rollkörper und seiner Unterlage wirkt eine Radialkraft  $F_r$ , deren Wirklinie durch den **Berührungspunkt** und den **Rollkörpermittelpunkt** geht. Sie ist **senkrecht** (normal) auf die Berührungstangente. Man kann sie daher auch als Normalkraft bezeichnen.

Bei kleinen Rollkörpern ist deren Gewichtskraft vernachlässigbar.

An ruhenden Rollkörpern tritt eine Tangentialkraft nur unter gleichen Bedingungen wie bei ebenen Berührungsflächen (3.2.3.) auf.

Tangentialkräfte treten an **rollenden** Rollkörpern (Abb.14) auf, sie bewirken die Drehung um die Drehachse.

Der Richtungssinn wird durch die Bewegung festgelegt: die Tangentialkraft wirkt dem **schnelleren** Bauteil **entgegen**.

Auf das langsamere Bauteil wirkt sie in Translationsrichtung des schnelleren Bauteils, wobei das langsamere Bauteil eine ruhende Unterlage sein kann.

Wenn beide Bauteile sich in entgegengesetzter Richtung bewegen, wirken die Tangentialkräfte jeweils den Bewegungsrichtungen entgegen.

#### Beispiel:

Die ruhende Rolle soll freigemacht werden

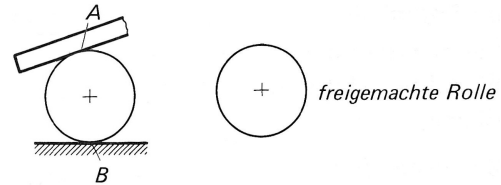
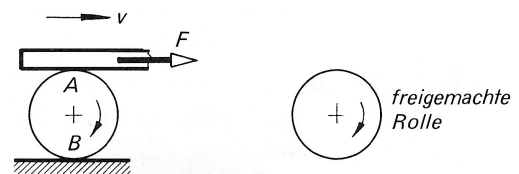


Abb.13: Freimachen von Rollkörpern

#### Beispiel:

Die bewegte Rolle soll freigemacht werden



Die Tangentialkräfte in den Punkten A und B bewirken eine Drehung (Kräftepaar)

Abb.14: Freimachen von bewegten Rollkörpern

### 3.2.5 Einwertige Lager = Loslager

#### Regel 5:

**Einwertige Lager** nehmen nur Kräfte **senkrecht zur Stützfläche** (Normalkräfte) auf.

Sie wirken **auf** den freigemachten Lagerpunkt **zu**.

**Einwertige Lager** werden als Stützen für Träger (z.B. Brücken, Wellen) eingesetzt, damit die Wärmeausdehnung der Werkstoffe in Längsrichtung nicht behindert wird.

Beim Freimachen (Abb.15) werden die Normalkräfte genauso wie bei Berührungsflächen und Rollkörpern eingetragen.

**Tangentialkräfte** werden **nicht** berücksichtigt, weil keine wesentlichen Längsbewegungen stattfinden.

#### Beispiel:

Das Loslager soll freigemacht werden

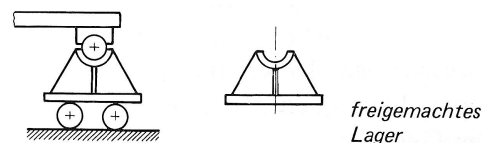
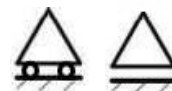


Abb.15: Freimachen am Loslager

Abb.16: Darstellungsmöglichkeiten von Loslagern



### 3.2.6 Zweiwertige Lager = Festlager

#### Regel 6:

**Zweiwertige Lager** können Kräfte in **jeder beliebigen Richtung** aufnehmen.

Beim Freimachen ersetzt man die Lagerkraft durch zwei **senkrecht aufeinander stehende Komponenten**.

Im Beispiel 1 sind ein Festlager (A) und ein Loslager (B) vereinfacht dargestellt.

**Zweiwertige Lager** werden als Stützen für Träger (z.B. Brücken, Wellen) eingesetzt, damit keine ungewollte Längsverschiebung stattfindet.

Die Wirklinie der Lagerkraft ist nicht eindeutig festzulegen. Da jede Kraft in zwei Komponenten zerlegt werden kann, werden beim Freimachen **zwei senkrecht zueinander stehende Wirklinien** eingetragen.

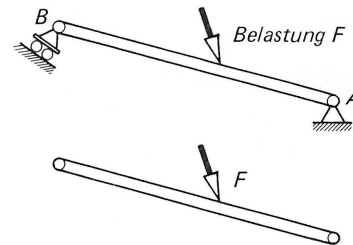
Unter Berücksichtigung aller anderen auftretenden Kräfte (Abb.18 und 19) wird der Richtungssinn der beiden Kraftkomponenten bestimmt. Deshalb sollten zweiwertige Lager am besten als letztes freigemacht werden.



Abb.17: Darstellung von Festlagern

#### Beispiel 1:

Der Träger auf zwei Stützen soll freigemacht werden

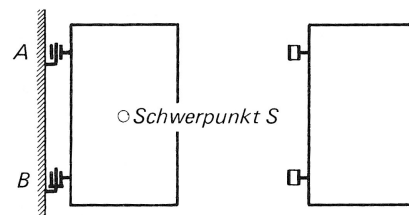


freigemachter Träger

Abb.18: Freimachen bei Fest- und Loslager

#### Beispiel 2:

Die Tür mit Halslager A und Spurlager B soll freigemacht werden



freigemachte Tür

Abb.19: Freimachen bei Fest- und Loslager

## 3.3 Übungen zum Freimachen

Richtiges Freimachen ist die Voraussetzung zum richtigen Lösen von Statikaufgaben. Durch systematisches Vorgehen wird das Freimachen erleichtert:

#### Arbeitsplan:

- |  |            |
|--|------------|
| 1. Lageplan des freizumachenden Bauteils zeichnen.                                       | 1. Schritt |
| 2. Kraftangriffspunkte = Berührungspunkte mit den Nachbarbauteilen festlegen.            | 2. Schritt |
| 3. Wirklinien aller Kräfte nach den Regeln 1 bis 6 des Freimachens einzeichnen.          | 3. Schritt |
| 4. Richtungssinn für alle Kraftpfeile nach den Regeln 1 bis 6 des Freimachens festlegen. | 4. Schritt |

#### Beispiel 1:

An dem Kurbelgetriebe einer Pumpe (Abb.20) sollen in der gezeichneten Stellung bei linksdrehender Kurbelwelle die Bauteile Schubstange, Kreuzkopf und Kreuzkopfführung freigemacht werden. Die Gewichtskräfte sind gegenüber den anderen Kräften zu vernachlässigen.

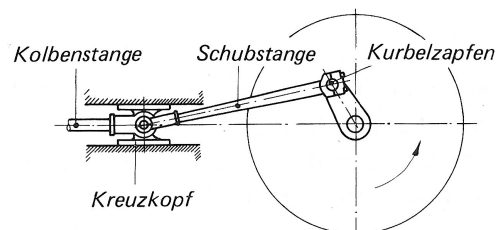


Abb.20: Kurbelgetriebe

**Lösung 1:****a) Schubstange:**

1. Schritt: Zunächst wird die Schubstange aufgezeichnet (Abb.21)

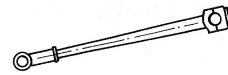


Abb.21: 1. Schritt

2. Schritt: In den Gelenkpunkten berührt sie die Nachbarteile Kurbelzapfen und Kreuzkopf. Es gibt somit zwei Kraftangriffspunkte (Abb.22). Die Schubstange ist ein Zweigelenkstab (Regel 2).

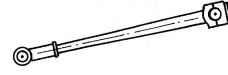


Abb.22: 2. Schritt

3. Schritt: Die Wirklinie ist die Längsachse der Schubstange (Abb.23).

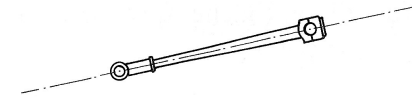


Abb.23: 3. Schritt

4. Schritt: Die Schubstange wird nach links gegen den Kreuzkopf geschoben und bewegt diesen gegen den Arbeitswiderstand. Sie nimmt folglich Druckkräfte auf (Abb.24).

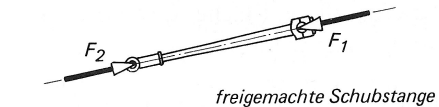


Abb.24: 4. Schritt

**b) Kreuzkopf:**

1. Schritt: Der Kreuzkopf wird aufgezeichnet

2. Schritt: Im Gelenk ist er mit der Schubstange und der Kolbenstange verbunden. Hier ist demnach ein Angriffspunkt für zwei Kräfte.

Zusätzlich liegt der Kreuzkopf auf der unteren Führungsfläche auf. Hier ist also ein zweiter Kraftangriffspunkt.

3. Schritt: Die Wirklinien der Schubstangenkraft  $F_2$  und der Kolbenstangenkraft  $F_3$  sind die Längsachsen der entsprechenden Stangen (Regel 2).

Durch den Angriffspunkt in der Berührungsfläche gehen zwei Wirklinien, da eine Normalkraft und eine Tangentialkraft (Reibkraft) wirken (Regel 3 für bewegten Körper).

4. Schritt: Schubstange und Kolbenstange drücken auf den Kreuzkopf.

Die Normalkraft wirkt auf die Berührungsfläche am Kreuzkopf zu.

Die Tangentialkraft wirkt der Bewegung entgegen, sie (Reibkraft!) will den Kreuzkopf bremsen.

In Abb.25 ist der freimachte Kreuzkopf dargestellt.

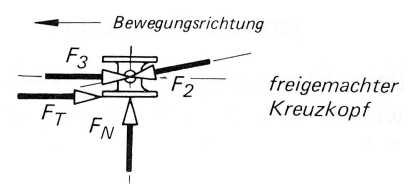


Abb.25: Schritte 1-4

**c) Kreuzkopfführung:**

In der dargestellten Lage des Kurbelgetriebes wird von der Kreuzkopfführung nur die untere Führungsfläche belastet. Da die Kreuzkopfführung in andere Maschinenteile eingebaut und somit gehalten ist, werden die Kräfte an der freigemachten Kreuzkopfführung nicht im Gleichgewicht sein.

1. Schritt: Die Kreuzkopfführung wird aufgezeichnet

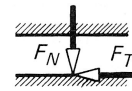
2. Schritt: Da der Kreuzkopf nur auf der unteren Führungsfläche aufliegt, gibt es nur einen Kraftangriffspunkt.

3. Schritt: In der Berührungsfläche wirken eine Normalkraft und eine Tangentialkraft (Reibkraft) (Regel 3 für bewegten Körper), somit werden zwei Wirklinien eingezeichnet.

**4. Schritt:** Die Normalkraft wirkt auf die Berührungsfläche am Kreuzkopf zu.

Die Tangentialkraft versucht die stillstehende Kreuzkopfführung in Bewegungsrichtung des Kreuzkopfes mitzunehmen (Reibkraft).

In Abb.26 ist die freigemachte Kreuzkopfführung dargestellt.



Kräfte vom Kreuzkopf  
auf die Kreuzkopfführung

Abb.26: Schritte 1-4

### Beispiel 2:

Der aufwärtsfahrende Wagen eines Schrägaufzuges (Abb.27) soll freigemacht werden.

Dabei ist zu beachten, dass der Wagen mit seiner Ladung als Ganzes freigemacht und nicht in Einzelteile zerlegt wird.

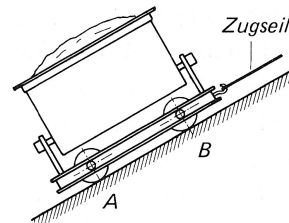


Abb.27: Wagen eines Schrägaufzuges

### Lösung 2:

Zur Lösung sind die 4 Schritte des Freischneidens durchzuführen. Bei diesem Beispiel ist insbesondere folgendes zu beachten:

- Nachbarteile des Wagens sind der Zughaken (das Zugseil) und die Fahrbahn.
- Die Gewichtskraft des Wagens muss berücksichtigt werden, ohne sie würden keine Kräfte auf die Nachbarteile wirken.
- Der Zughaken wird nach Regel 1 (Seile) freigemacht.
- Die Räder werden nach Regel 4 (Rollkörper) freigemacht. Da der Wagen rollt wirken neben den Radialkräften auch Tangentialkräfte.

In Abb.28 ist der freigemachte Wagen dargestellt

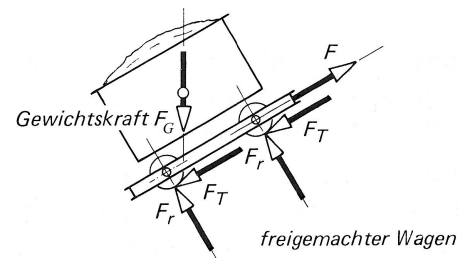


Abb.28: Freigemachter Wagen

### Beispiel 3:

Ein Wanddrehkran ist in einem oberen Halslager A und einem unteren Spurlager B drehbar gelagert (Abb.29). Am Schwenkarm hängt eine Last F, die senkrecht nach unten wirkt.

Der Schwenkarm ist freizumachen.

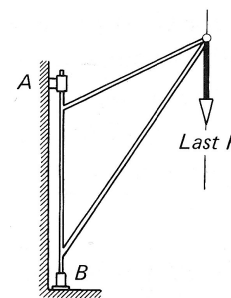


Abb.29: Wanddrehkran mit Last



**Lösung 3:**

Grundsätzlich sind die 4 Schritte des Freischneidens durchzuführen. Bei diesem Beispiel ist insbesondere folgendes zu beachten:

- Nachbarteile des Schwenkarms sind das Halslager A und das Spurlager B, es gibt somit zwei Angriffspunkte.
- Die Last  $F$  kann sofort eingezeichnet werden da ihr Angriffspunkt, ihre Wirklinie und ihr Richtungssinn bereits vorgegeben sind.
- Das Halslager A ist einwertig, es erlaubt eine Verschiebung nach oben oder unten. Die Wirklinie wird nach Regel 5 (Loslager) festgelegt.
- Entfernt man das Halslager A, würde der Schwenkarm nach rechts drehen. Die Lagerkraft  $F_A$  verhindert dies, sie muss nach links wirken.
- Das Spurlager B ist zweiwertig. Wirklinien und Richtungssinn werden nach Regel 6 (Festlager) festgelegt: es werden zwei senkrecht zueinander stehende Wirklinien eingezeichnet.
- Entfernt man das Spurlager B, fällt der Schwenkarm nach unten und dreht nach links. Die Lagerkräfte  $F_{Bx}$  und  $F_{By}$  verhindern dies, sie müssen nach oben bzw. rechts wirken.

In Abb.30 ist der freigemachte Schwenkarm dargestellt.

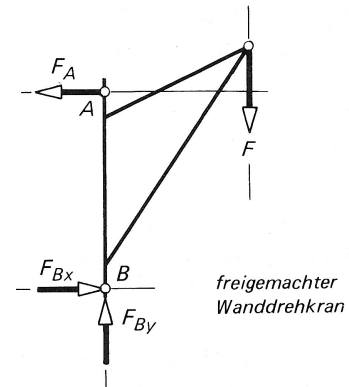


Abb.30: Freigemachter Schwenkarm

### 3.4 Aufgaben zum Freimachen

#### Aufgaben 1 bis 8:

Die in nachfolgenden Bildern dargestellten Körper sollen vollständig freigemacht werden. Berührungsflächen und Lager sind auch freizumachen.

Gegebenenfalls vorhandene Gewichtskräfte greifen jeweils im Schwerpunkt S des Körpers an.

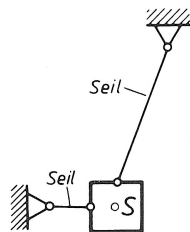


Abb.31: Aufgabe 1

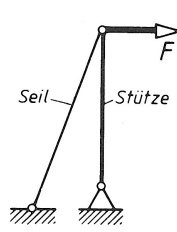


Abb.32: Aufgabe 2

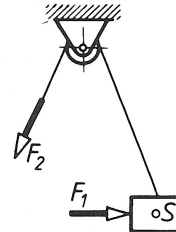


Abb.33: Aufgabe 3

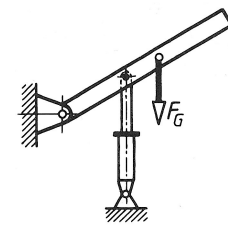


Abb.34: Aufgabe 4

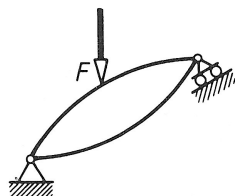


Abb.35: Aufgabe 5

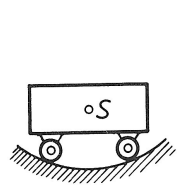


Abb.36: Aufgabe 6

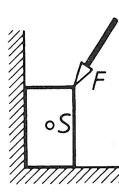


Abb.37: Aufgabe 7

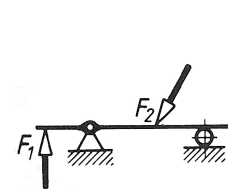


Abb.38: Aufgabe 8



## B Die Grundaufgaben der Statik

### 1 Begriffserklärungen

#### 1.1 Zentrales und allgemeines Kräftesystem

Unter einem Kräftesystem versteht man beliebig viele Kräfte, die gleichzeitig an einem Bauteil wirken.

Ein **zentrales Kräftesystem** (Abb.1) liegt vor, wenn sich die Wirklinien aller Kräfte in einem gemeinsamen Punkt schneiden. Wir nennen diesen Schnittpunkt *den Zentralpunkt A* des Kräftesystems.

Nach dem Längsverschiebungssatz können wir alle Kräfte des Systems auf ihren Wirklinien in diesen Zentralpunkt verschieben. Ein zentrales Kräftesystem kann einen Körper **nur verschieben**, aber nicht drehen.

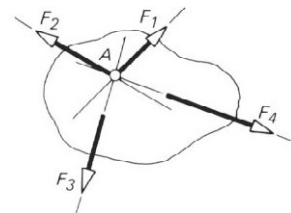


Abb.1: Zentrales Kräftesystem

Ein **allgemeines Kräftesystem** (Abb.2) besteht aus Kräften, deren Wirklinien mehr als einen Schnittpunkt miteinander haben.

Allgemeine Kräftesysteme können genauso wie zentrale Kräftesysteme einen Körper **verschieben**. Sie können ihn aber außerdem **drehen** oder beide Bewegungen gleichzeitig hervorrufen.

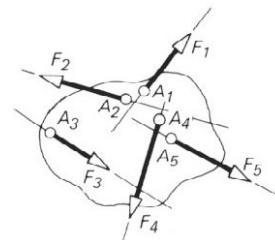


Abb.2: Allgemeines Kräftesystem

In den nachfolgenden Kapiteln wird nur das allgemeine Kräftesystem behandelt.

Aufgaben zum zentralen Kräftesystem lösen sich in ähnlicher Weise, grundsätzlich vereinfachen sich die Vorgänge da hier keine Momente wirken.

#### 1.2 Hauptaufgaben in der Statik

##### 1. Hauptaufgabe:

In einem Kräftesystem sind alle Kräfte nach Betrag, Lage und Richtungssinn bekannt (Abb.3).

Um eine Aussage über die Wirkung des Kräftesystems auf ein Bauteil machen zu können (z. B. Verschiebung), muß die **Resultierende  $F_R$**  ermittelt werden.

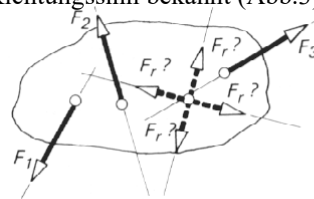


Abb.3: Zu ermittelnde Resultierende

bekannt:  $F_1, F_2, F_3$   
gesucht:  $F_R$

##### 2. Hauptaufgabe:

In einem Kräftesystem, das sich im Gleichgewicht befindet, ist nur *ein Teil* der Kräfte bekannt (Abb.4).

Um eine Festigkeitsberechnung an dem Bauteil ausführen zu können, müssen die noch **unbekannten Kräfte** ermittelt werden.

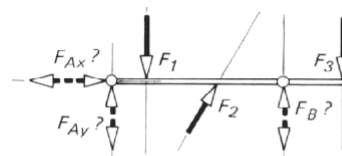


Abb.4: Zu ermittelnde unbekannte Kräfte

bekannt:  $F_1, F_2, F_3$   
gesucht:  $F_{Ax}, F_{Ay}, F_B$

### 1.3 Die zwei Lösungsmethoden

Jede der beiden Hauptaufgaben ist auf zweierlei Weise lösbar:

- zeichnerisch** und
- rechnerisch.**

Die **zeichnerische Lösung** erfordert

- einen maßstäblich aufgezeichneten **Lageplan**, der das Bauteil (meist in vereinfachter Darstellung) mit allen, ebenfalls maßstäblich eingezeichneten Wirklinien darstellt, und
- einen **Kräfteplan**, der alle Kräfte maßstabs- und richtungsgerecht enthält.

Die **rechnerische Lösung** erfordert

- eine **Lageskizze**, die unmaßstäblich sein kann, **aber alle Kräfte als Kraftpfeile** sowie alle erforderlichen Längenmaße und Winkel – insbesondere die zwischen den Wirklinien der Kräfte und einer Bezugsachse - enthalten muß, und
- den **rechnerischen Ansatz** in Form einer Gleichung oder eines Gleichungssystems, das aus der Lageskizze entwickelt wird.

In den nachfolgenden Kapiteln wird nur auf die rechnerische Lösung nach der analytischen Methode eingegangen.

*Hinweis:*

Lageplan und Kräfteplan werden stets auf *einem* Blatt aufgezeichnet.

Längen- und Kräftemaßstab werden so gewählt, daß die Pläne nicht zu klein werden.

Der Lageplan wird zuerst gezeichnet, und daraus wird der Kräfteplan durch Parallelverschiebung der Wirklinien aus dem Lageplan in den Kräfteplan entwickelt. Zeichnen Sie *stets* zwei getrennte Pläne!

*Hinweis:*

Bei der rechnerischen Lösung kann man „analytisch“ vorgehen (analytische Methode) oder Kraftecke „trigonometrisch“ auswerten. Zur analytischen Lösung legt man die Kraftpfeile in ein rechtwinkliges Achsenkreuz und arbeitet mit ihren senkrecht aufeinanderstehenden Komponenten (x- und y-Komponenten)

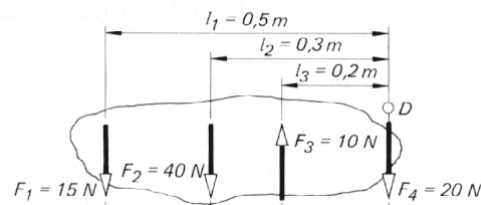
## 2 Grundaufgaben der Statik im allgemeinen Kräftesystem

### 2.1 Rechnerische Ermittlung der Resultierenden

#### Beispiel:

Für das in der Lageskizze (Abb.1) dargestellte Kräftesystem soll die **Resultierende nach Betrag, Neigungswinkel und Richtungssinn** rechnerisch ermittelt werden. Die Wirklinien der Kräfte liegen parallel, weil dieser Fall die größere praktische Bedeutung hat und der Lösungsgang übersichtlicher wird.

Abb.1: Allgemeines Kräftesystem



#### Vorüberlegung:

**Betrag, Neigungswinkel und Richtungssinn** der Resultierenden können wir mit der analytischen Methode d.h. durch Zerlegen der Kräfte ermitteln.

Dieser Lösung liegen folgende Gedanken zugrunde:

#### 1. x- und y-Komponenten der Kräfte

Jede Kraft wird in die beiden senkrecht aufeinanderstehenden Komponenten in Richtung der Achsen eines rechtwinkligen Achsenkreuzes zerlegt. Als Bezugswinkel für die Wirklinien der Kräfte verwenden wir stets den Winkel  $\alpha$ , den die Kraft mit der *positiven* x-Achse einschließt, und zwar im positiven Linksdrehsinn von  $0^\circ$  bis  $+360^\circ$  (Richtungswinkel). Wir erhalten dann Berechnungsgleichungen, die wir immer wieder in derselben Form gebrauchen können.

Die Komponenten einer unter dem Richtungswinkel  $\alpha$  geneigten Kraft sind:

Der Rechner liefert uns durch das Vorzeichen beim Ergebnis den Richtungssinn der Kraftkomponenten  $F_x$  und  $F_y$  mit. Das negative Vorzeichen für eine x-Komponente zeigt den Richtungssinn „nach links“, für eine y-Komponente „nach unten“ an.

Wir schreiben nun die Gleichungen zur Berechnung der senkrecht aufeinander stehenden Komponenten in der allgemeinen Form. Der Buchstabe  $i$  steht für den Index 1,2,3... der Kräfte und ihrer Richtungswinkel  $\alpha$ .

Die x-Komponenten  $F_{ix}$  sind die Produkte aus den Kraftbeträgen  $F_i$  und dem Kosinus der Richtungswinkel  $\alpha_i$ . Bei den y-Komponenten tritt an die Stelle der Kosinusfunktion die Sinusfunktion.

## 2. x- und y-Komponenten der Resultierenden

Die Summe der x-Komponenten der Einzelkräfte ist die x-Komponente  $F_{Rx}$  der Resultierenden. Gleiches gilt für die y-Komponente  $F_{Ry}$  der Resultierenden.

Setzen wir stets den Richtungswinkel ein, zum Beispiel  $\alpha_2 = 135^\circ$ , brauchen wir uns um den Richtungssinn der Komponenten nicht zu kümmern. Der Rechner nimmt das jeweilige Vorzeichen bei der Addition mit.

## 3. Betrag der Resultierenden

Da die beiden Komponenten  $F_{Rx}$  und  $F_{Ry}$  senkrecht aufeinander stehen, können wir mit dem Lehrsatz des Pythagoras den Betrag  $F_R$  der Resultierenden berechnen, denn  $F_r$  ist die Diagonale des rechtwinkligen Kraftecks aus  $F_{Rx}$ ,  $F_{Ry}$  und  $F_R$ .

## 4. „Spitzer“ Winkel der Resultierenden

Der Richtungswinkel  $\alpha_R$  der Resultierenden kann nicht auf direktem Wege ermittelt werden. Wir brauchen erst den spitzen Winkel  $\beta_R$ , den die **Wirklinie der Resultierenden  $F_R$  mit der x-Achse** einschließt.

Es ist gleichgültig, in welchem Quadranten die Resultierende liegt. Dieser spitze Winkel  $\beta_R$  kann im rechtwinkligen Dreieck mit der Tangensfunktion ermittelt werden, denn die beiden Katheten  $F_{Rx}$  und  $F_{Ry}$  sind jetzt bekannt.

Damit sich keine negativen Winkel ergeben, darf nur mit den Beträgen gerechnet werden.

## 5. Richtungswinkel der Resultierenden

Je nach Lage der Resultierenden  $F_R$  im rechtwinkligen Achsenkreuz ergeben sich folgende Gleichungen zur Berechnung des Richtungswinkels  $\alpha_R$ :

### • $F_r$ liegt im I. Quadranten:

In diesem Fall ist der Richtungswinkel  $\alpha_R$  gleich dem spitzen Winkel  $\beta_r$  zwischen der positiven x-Achse und der Wirklinie der Resultierenden. Die Resultierende  $F_R$  liegt dann im I. Quadranten, wenn die Komponentenberechnung ergibt:

$F_{Rx} \rightarrow$  positives Vorzeichen ( $F_{Rx} \geq 0$ )

$F_{Ry} \rightarrow$  positives Vorzeichen ( $F_{Ry} \geq 0$ )

### • $F_r$ liegt im II. Quadranten:



Der spitze Winkel  $\beta_R$  liegt zwischen der negativen x-Achse und der Wirklinie der Resultierenden. Die Resultierende  $F_R$  liegt dann im II. Quadranten, wenn die Komponentenberechnung ergibt:

$F_{Rx} \rightarrow$  negatives Vorzeichen ( $F_{Rx} < 0$ )

$F_{Ry} \rightarrow$  positives Vorzeichen ( $F_{Ry} \geq 0$ )

•  $F_r$  liegt im III. Quadranten:

Der spitze Winkel  $\beta_r$  liegt zwischen der negativen x-Achse und der Wirklinie der Resultierenden. Die Resultierende  $F_r$  liegt dann im III. Quadranten, wenn die Komponentenberechnung ergibt:

$F_{Rx} \rightarrow$  negatives Vorzeichen ( $F_{Rx} < 0$ )

$F_{Ry} \rightarrow$  negatives Vorzeichen ( $F_{Ry} < 0$ )

•  $F_r$  liegt im IV. Quadranten:

Der spitze Winkel  $\beta_R$  liegt zwischen der positiven x-Achse und der Wirklinie der Resultierenden. Die Resultierende  $F_R$  liegt dann im IV. Quadranten, wenn die Komponentenberechnung ergibt:

$F_{Rx} \rightarrow$  positives Vorzeichen ( $F_{Rx} \geq 0$ )

$F_{Ry} \rightarrow$  negatives Vorzeichen ( $F_{Ry} < 0$ )

#### Arbeitsplan zur rechnerischen Ermittlung der Resultierenden:

Lageskizze mit allen gegebenen Kräften unmaßstäblich aufzeichnen. 1. Schritt

Die x- und y-Komponenten eintragen.

Gegebene Kraftbeträge  $F_1, F_2, F_3 \dots$  und Richtungswinkel  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$  2. Schritt

aufschreiben. Richtungswinkel von der positiven x-Achse von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  im Linksdrehsinn festlegen.

Mit den Kraftbeträgen und Richtungswinkeln die Komponenten  $F_{Rx}$  3. Schritt

und  $F_{Ry}$  der Resultierenden  $F_R$  berechnen.

$$F_{Rx} = \sum_{i=1}^n F_{ix} \quad F_{Ry} = \sum_{i=1}^n F_{iy}$$

Betrag der Resultierenden  $F_r$  aus den Komponenten  $F_{Rx}$  und  $F_{Ry}$  4. Schritt

berechnen (Pythagoras).

$$F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2}$$

Aus den Vorzeichen für die Komponenten  $F_{Rx}$  und  $F_{Ry}$  den 5. Schritt

Quadranten für die Resultierende  $F_R$  feststellen.

Richtungswinkel  $\alpha_R$  der Resultierenden  $F_R$  berechnen. 6. Schritt

$$\beta_R = \arctan \left| \frac{F_{Ry}}{F_{Rx}} \right|$$

$$\alpha_R \Leftrightarrow \beta_R$$



**Lösung:**

Wir zeichnen eine **unmaßstäbliche Lageskizze** (Abb.2), in die wir alle gegebenen Kräfte und alle bekannten Abstandsmaße eintragen.

Da hier alle Wirklinien parallel sind, brauchen wir nur die algebraische Summe aller Kräfte zu ermitteln.

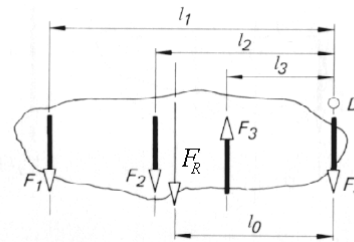


Abb.2: Lageskizze

$$F_R = \sum_{i=1}^4 F_{iy} = -F_1 - F_2 + F_3 - F_4$$

$$F_R = -15\text{N} - 40\text{N} + 10\text{N} - 20\text{N}$$

$$F_R = -65\text{N}$$

Minuszeichen bedeutet hier:  $F_R$  nach unten!

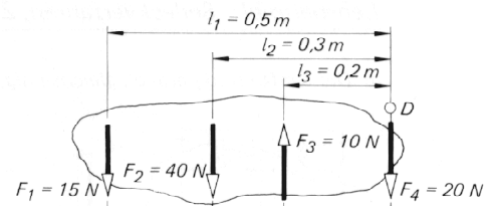
Erst dann zeichnen wir die Resultierende mit dem ermittelten Richtungssinn in die Lageskizze ein, und zwar auf einer Wirklinie, deren Lage wir unter Berücksichtigung der gegebenen Kräfte „nach Gefühl“ annehmen (hier zwischen den Wirklinien von  $F_2$  und  $F_3$ ).

Die **tatsächliche Lage** der Resultierenden bestimmen wir mit dem **Momentensatz**.

**2.2 Momentensatz****Beispiel:**

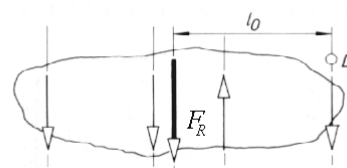
Für das in der Lageskizze (Abb.3) dargestellte Kräftesystem soll die **Lage** der **Resultierenden** rechnerisch ermittelt werden.

Abb.3: Kräfte im Kräftesystem



Die Resultierende muß die **gleiche Drehwirkung** wie das Kräftesystem haben, und davon hängt ihre **Lage** ab. Diese Erkenntnis ist im **Momentensatz** (Abb.4) festgelegt

Das **Kraftmoment**  $M_R$  der Resultierenden, bezogen auf einen beliebigen Punkt D, ist gleich der Summe der Kraftmomente der Einzelkräfte in bezug auf denselben Punkt.



$$M_R = M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_n$$

$$F_R \cdot l_0 = F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2 + F_3 \cdot l_3 + \dots + F_n \cdot l_n$$

Abb.4: Momentensatz

*Beachte:*

Vorzeichen entsprechend dem Drehsinn einsetzen (links +, rechts -)!





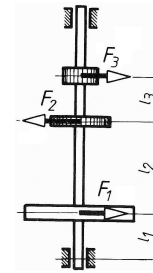
## 2.3 Aufgaben zur Ermittlung der Resultierenden

### Aufgabe 1:

Eine Welle (Abb.6) wird durch drei parallele Zahn- und Riemenkräfte  $F_1 = 500 \text{ N}$ ,  $F_2 = 800 \text{ N}$  und  $F_3 = 2100 \text{ N}$  belastet. Die Abstände betragen  $l_1 = 150 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 300 \text{ mm}$  und  $l_3 = 150 \text{ mm}$ .

- Wie groß ist der Betrag der Resultierenden?
- Wie ist ihr Richtungssinn?
- Wie groß ist der Abstand der Wirklinie der Resultierenden zur unteren Lagermitte?

Abb.6: Welle



Ergebnisse: a)  $F_R = 1800 \text{ N}$  b)  $\alpha_R = 0^\circ$  c)  $l_0 = 541,67 \text{ mm}$

### Aufgabe 2:

Der skizzierte zweiarmige Hebel (Abb.7) wird mit den Kräften  $F_1 = 300 \text{ kN}$ ,  $F_2 = 200 \text{ kN}$ ,  $F_3 = 500 \text{ kN}$  und  $F_4 = 100 \text{ kN}$  belastet. Die Abstände betragen  $l_1 = 2 \text{ m}$ ,  $l_2 = 4 \text{ m}$ ,  $l_3 = 3,5 \text{ m}$  und der Winkel  $\alpha = 50^\circ$ .

- Schneide den Hebel und das Lager frei.
- Wie groß ist der Betrag der Stützkraft im Lager A?
- Unter welchem Winkel zum Hebel wirkt die Stützkraft?
- Wie groß muß der Abstand  $l$  des Hebellagers A zum Angriffspunkt von  $F_1$  sein, wenn der Hebel im Gleichgewicht sein soll?

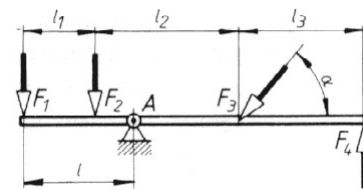


Abb.7: Hebel

### Lösungshinweis:

Die Stützkraft ist die Gegenkraft der Resultierenden aus  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  und  $F_4$ .

Ergebnisse: b)  $F_{Rx} = -321,39 \text{ kN}$ ;  $F_{Ry} = -783,00 \text{ kN}$ ;  $F_R = 846,42 \text{ kN}$ ;  
c)  $(\beta_R = 67,68^\circ)$   $\alpha_R = 247,68^\circ$  d)  $l_0 = 2,065 \text{ m}$ ;  $l = 2,233 \text{ m}$

### Aufgabe 3:

An einer Bodenklappe (Abb.8) wirken ihre Gewichtskraft  $F_G = 2 \text{ kN}$ , die Kraft  $F_1 = 1,5 \text{ kN}$  und über eine Kette die Kraft  $F_2 = 0,5 \text{ kN}$ . Die Abstände betragen  $l_1 = 0,2 \text{ m}$ ,  $l_2 = 0,8 \text{ m}$ ,  $l_3 = 0,9 \text{ m}$ ,  $l_4 = 1,8 \text{ m}$  und der Winkel  $\alpha = 43^\circ$ .

- Wie groß ist der Betrag der Resultierenden auf die Klappe (freischneiden)?
- Wie groß ist ihr Winkel  $\alpha_R$  zur Waagerechten?
- Wie groß ist der Wirkabstand  $l_0$  der Resultierenden zum Klappendrehpunkt 0?
- Mit welchem Abstand  $l$  zum Klappendrehpunkt geht die Wirklinie der Resultierenden durch die Klappe?

Ergebnisse: b)  $F_{Rx} = 0,36568 \text{ kN}$ ;  $F_{Ry} = -3,15900 \text{ kN}$ ;  $F_R = 3,18010 \text{ kN}$ ;  
b)  $(\beta_R = 83,40^\circ)$   $\alpha_R = -83,40^\circ$  c)  $l_0 = 0,22650 \text{ m}$  d)  $l = 0,22802 \text{ m}$

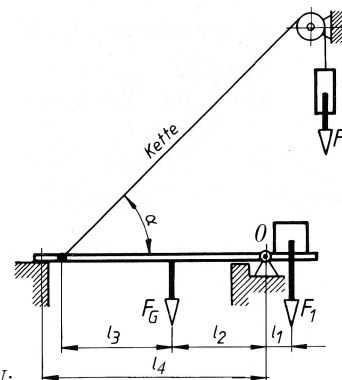


Abb.8: Bodenklappe

## 2.4 Ermittlung unbekannter Kräfte

Damit ein Kräftesystem im Gleichgewicht ist, müssen drei Gleichgewichtsbedingungen erfüllt sein. Die Ermittlung unbekannter Kräfte in diesem Kräftesystem bedingt das Auflösen dieser Gleichgewichtsbedingungen nach den unbekanntem Größen.

Die **rechnerischen Gleichgewichtsbedingungen** im allgemeinen Kräftesystem lauten:

I.	$\Sigma F_x = 0$
II.	$\Sigma F_y = 0$
III.	$\Sigma M_{(D)} = 0$

Der Körper ist dann im Gleichgewicht, wenn:

- die Summe aller Kräfte (oder Komponenten) in Richtung der x-Achse gleich Null ist,
- die Summe aller Kräfte (oder Komponenten) in Richtung der y-Achse gleich Null ist
- und die Summe aller Kraftmomente, bezogen auf einen beliebigen Punkt D gleich Null ist.

### Beispiel:

Ein Wanddrehkran (Abb.9) wird an seinem Lastseil mit einer Kraft  $F = 30 \text{ kN}$  belastet.

Die Stützkkräfte in seinem Halslager A und seinem Spurlager B sollen berechnet werden.

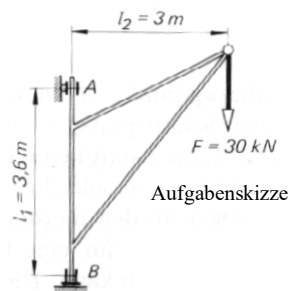


Abb.9: Wandkran

### Vorüberlegung:

Bei jeder rechnerischen Behandlung eines beliebigen Kräftesystems müssen wir **alle Kräfte**, auch die unbekanntem, in x- und y-Komponenten nach den Achsrichtungen eines rechtwinkligen Achsenkreuzes **zerlegen**. **Vergessen wir eine Kraft, wird die Lösung falsch.**

Wir legen das Achsenkreuz nach der Lageskizze so fest, daß möglichst wenige Kräfte in Komponenten zerlegt werden müssen. Im Normalfall liegen dann die x-Achse waagrecht und die y-Achse senkrecht (Abb.10).

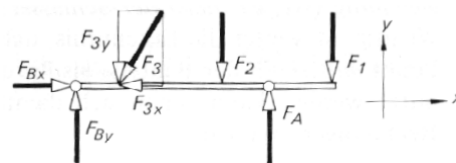


Abb.10: Häufiges Achsenkreuz

Mitunter ist es zweckmäßiger, das Achsenkreuz anders zu legen, wie das nebenstehende Beispiel (Abb.11) zeigt.

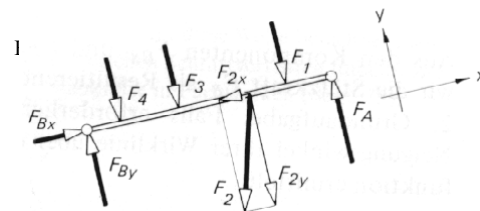


Abb.11: Angepasstes Achsenkreuz

**Lösung:**

Wir zeichnen die (unmaßstäbliche) Lageskizze des freigemachten Wanddrehkrans und tragen entsprechend den Regeln für das Freimachen *alle* Kräfte ein, auch die noch unbekanntes:

Belastung  $F$ : Betrag, Wirklinie und Richtungssinn *bekannt*;  
Halslagerkraft  $F_A$ : Betrag *unbekannt*, Wirklinie *bekannt*, Richtungssinn „nach Gefühl“ *angenommen*;  
Spurlagerkraft  $F_B$ : Betrag, Wirklinie und Richtungssinn *unbekannt*; wir tragen daher ihre Komponenten  $F_{Bx}$  und  $F_{By}$  in Richtung der beiden Achsen ein, die wir waagrecht und senkrecht legen. Ihr Richtungssinn wird nach Gefühl angenommen.

Anhand der Lageskizze stellen wir nun die Gleichgewichtsbedingungen auf. Wir erhalten damit ein Gleichungssystem mit den drei Unbekannten  $F_A$ ,  $F_{Bx}$  und  $F_{By}$ , das wir mit den Regeln der Gleichungslehre schrittweise nach diesen Größen auflösen.

Den Momentenbezugspunkt D für Gleichung III legen wir in den Schnittpunkt möglichst vieler unbekannter Kräfte, die damit keine Drehwirkung haben und in der Momentengleichgewichtsbedingung nicht erscheinen. In den meisten Fällen enthält dann diese Gleichung nur eine Unbekannte, die sofort berechnet werden kann:

*Die Momentengleichung (III) ist meist der Schlüssel zur Lösung!*

Wichtig ist weiter die Erkenntnis, daß auch jeder Punkt *außerhalb* der Bauteile als Bezugspunkt benutzt werden kann, wenn sich damit einfachere Rechnungen ergeben.

Die Kräfte  $F_A$ ,  $F_{Bx}$  und  $F_{By}$  ergeben sich aus der Rechnung positiv (d.h. mit Plus-Vorzeichen). Das bedeutet daß in der Lageskizze ihr Richtungssinn richtig angenommen wurde.

Ergibt sich eine negative Kraft (d.h. mit Minus-Vorzeichen), dann bedeutet das, daß sie dem angenommenen Richtungssinn entgegen wirkt.

*Beachte:*

Das Minuszeichen muß bei der weiteren Auflösung des Gleichungssystems mitgeführt werden!

Aus den Komponenten  $F_{Bx}$  und  $F_{By}$  berechnen wir die Stützkraft  $F_B$  als Resultierende wie in der 2. Grundaufgabe. Falls erforderlich wird der Neigungswinkel ihrer Wirklinie über die Tangensfunktion ermittelt.

*Ergebnis:*

Im Lager A wirkt eine Kraft von 25 kN nach links, im Lager B eine Kraft von 39 kN nach rechts oben.

**Arbeitsplan zur Ermittlung unbekannter Kräfte:**

Lageskizze des freigemachten Bauteils mit allen Kräften zeichnen; Richtungssinn der unbekanntes Kräfte nach Gefühl annehmen. 1. Schritt

Gleichgewichtsbedingungen aufstellen und auswerten. Beim Momentensatz müssen die Beträge der Kräfte verwendet und der Richtungssinn der Momente mit Vorzeichen eingesetzt werden. 2. Schritt

Falls erforderlich, Richtungssinn der unbekanntes Kräfte korrigieren. 3. Schritt



## 2.5 Aufgaben zur Ermittlung unbekannter Kräfte

### Aufgabe 4:

Ein Fräserdorn (Abb.12) wird durch den Fräser mit der Kraft  $F_u = 5 \text{ kN}$  belastet. Die Abstände zwischen dem Festlager A und dem Loslager B betragen  $l_1 = 130 \text{ mm}$  und  $l_2 = 170 \text{ mm}$ .

Wie groß sind die Stützkkräfte in den Lagern A und B?

Ergebnisse:  $F_{Ay} = 2,83 \text{ kN}$ ;  $F_B = 2,17 \text{ kN}$

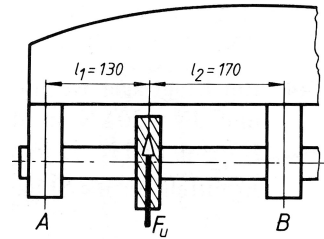


Abb.12: Fräserdorn

### Aufgabe 5:

Wie groß sind die Auflagerkräfte (Betrag und Richtung) in Aufgabe 3?

Ergebnisse:  $F_A = 0,40015 \text{ kN}$ ;  $F_{Bx} = 0,36550 \text{ kN}$ ;  $F_{By} = 2,75878 \text{ kN}$ ;  $F_B = 2,78289 \text{ kN}$ ; ( $\beta_R = 82,45^\circ$ )  $\alpha_B = 97,55^\circ$

### Aufgabe 6:

Das skizzierte Vorderrad eines Fahrrades (Abb.13) ist mit  $F = 250 \text{ N}$  belastet.

Die Abmessungen betragen  $l_1 = 200 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 750 \text{ mm}$  und  $\alpha = 15^\circ$ .

- Wie groß ist der Betrag der Stützkraft im Halslager B?
- Wie groß ist der Betrag der Stützkraft im Spurlager A?
- Wie groß ist der Winkel zwischen der Kraft  $F_B$  und der Lenksäule?
- Wie groß ist der Winkel zwischen der Kraft  $F_A$  und der Lenksäule?

Ergebnisse: a)  $F_B = 242,64$

b)  $F_{Ax} = 307,35 \text{ N}$ ;

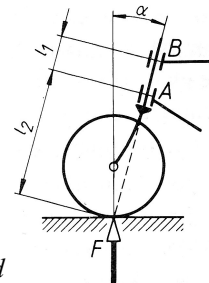
$F_{Ay} = 241,50 \text{ N}$ ;

$F_A = 390,87 \text{ N}$

c)  $\alpha_{B,L} = 90,00^\circ$

d)  $\alpha_{A,L} = 51,84^\circ$

Abb.13: Vorderrad



### 3 Zusatzaufgaben

#### Aufgabe 1:

Der dargestellte Träger (Abb.14) wird durch die beiden Kräfte  $F_1 = 4 \text{ kN}$  und  $F_2 = 2 \text{ kN}$  belastet. Die Länge  $a = 1 \text{ m}$ .

- Wie groß ist die Resultierende? (Betrag und Winkel)
- Wie groß ist der Abstand der Resultierenden zum Lagerpunkt A?

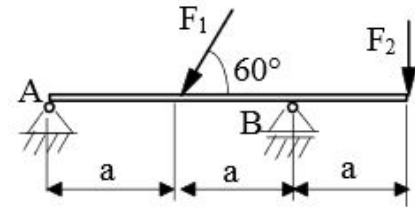


Abb.14: Träger

Ergebnisse: a)  $F_R = 5,82 \text{ kN}$ ;  $(\beta_R = 69,88^\circ)$   $\alpha_R = 249,88^\circ$   
 b)  $l_0 = 1626,13 \text{ mm}$ ;  $l = 1731,82 \text{ mm}$

#### Aufgabe 2:

Eine Sicherheitsklappe (Abb.15) mit der Eigengewichtskraft  $F_G = 11 \text{ N}$  verschließt durch die Druckkraft  $F = 50 \text{ N}$  einer Feder eine Öffnung von  $d = 20 \text{ mm}$  lichtigem Durchmesser in einer Druckrohrleitung. Der Hebeldrehpunkt ist so zu legen, daß sich die Klappe bei  $p = 6 \text{ bar}$  Überdruck in der Rohrleitung öffnet. Die Abstände betragen  $l_1 = 90 \text{ mm}$  und  $l_2 = 225 \text{ mm}$ .

- Mit welcher Kraft wird der Hebeldrehpunkt A belastet (freischneiden)?
- Wie groß muß der Abstand  $l_0$  für den Hebeldrehpunkt A gewählt werden?

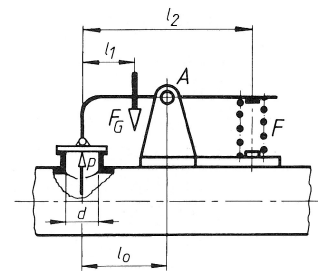


Abb.15: Sicherheitsklappe

Ergebnisse: a)  $F_R = 227,50 \text{ N}$  durch A  
 b)  $l_0 = 45,10 \text{ mm}$ ; Hebeldrehpunkt links von WL von  $F_G$

#### Aufgabe 3:

Der Klappptisch einer Blechbiegepresse (Abb.16) ist mit der Kraft  $F = 12 \text{ kN}$  belastet und wird durch einen Hydraulikkolben gehoben.

- Wie groß ist die erforderliche Kolbenkraft  $F_K$ ?
- Wie ist der Betrag der Lagerkraft  $F_S$  in dem Schwenklager?
- Wie groß ist der Winkel, den diese Lagerkraft mit der Waagerechten einschließt?

Ergebnisse: a)  $F_K = 24,99 \text{ kN}$   
 b)  $F_{Sx} = 21,43 \text{ kN}$ ;  $F_{Sy} = 0,86 \text{ kN}$ ;  $F_S = 21,45 \text{ kN}$   
 c)  $\alpha_S = -2,29^\circ$ ;  $\alpha_K = 149,04^\circ$

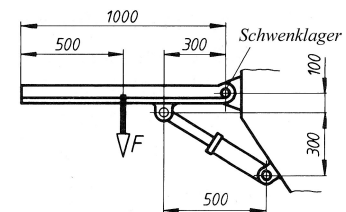


Abb.16: Klappptisch

#### Aufgabe 4:

Eine Kolbendampfmaschine (Abb.17) hat den Kolbendurchmesser  $d = 200 \text{ mm}$ , im Zylinder wirkt der Überdruck  $p = 10 \text{ bar}$ . Die Schubstange hat die Länge  $l = 1000 \text{ mm}$ , der Kurbelradius beträgt  $r = 200 \text{ mm}$ . Berechne die Schubstangenkraft  $F_S$  und die Normalkraft  $F_N$ , mit der der Kreuzkopf auf seine Gleitbahn drückt (Reibung vernachlässigen).

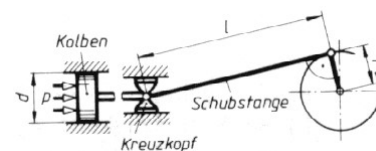


Abb.17: Kolbendampfmaschine

Ergebnisse:  $F_p = 31,42 \text{ kN}$ ; Freischneiden Kreuzkopf siehe Bsp.1b) Kap. I.3.3;  
 $F_S = 32,04 \text{ kN}$ ;  $F_N = 6,28 \text{ kN}$



## C Dynamik

### 1 Arbeit

#### 1.1 Arbeit einer konstanten Kraft

Soll der skizzierte Wagen (Abb.1) längs eines Weges  $s$  gezogen (oder verschoben) werden, muß dazu eine Kraft  $F$  in Richtung des Weges wirken. Ihren Betrag können wir z. B. mit einer Federwaage messen.

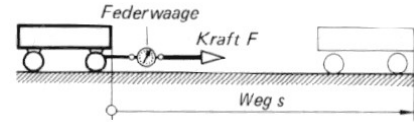


Abb.1: Gezogener Wagen

Wir nehmen zunächst an: Die Kraft  $F$  wirkt exakt in Richtung des Weges, also nicht etwa schräg nach oben oder unten, und ihr Betrag bleibt während des Vorgangs gleich groß ( $F = \text{konstant}$ ).

Um den physikalischen Aufwand bei solchen Vorgängen vergleichen zu können, hat man den Begriff der Arbeit  $W$  geschaffen:

Die **Arbeit  $W$**  einer konstanten Kraft  $F$  ist das Produkt aus Kraft  $F$  und Verschiebeweg  $s$ .

(Arbeit gleich Kraft mal Weg).

Die Arbeit ist ein Skalar.

$$W = F \cdot s$$

$F$ : Kraft in N

$s$ : Verschiebeweg in m

$$W: \text{Arbeit in J} = \text{N} \cdot \text{m} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Die gesetzliche und internationale Einheit der Arbeit ist das Joule.

#### Zur Veranschaulichung:

Hebt man eine 100 g-Tafel Schokolade 1 m hoch, dann hat man an der Tafel die Arbeit von etwa 1 Joule aufgebracht.

Die Einheit Joule wurde nach dem Physiker J. P. Joule (1818-1889) benannt.

1 **Joule** (Kurzzeichen J) ist gleich der Arbeit die verrichtet wird, wenn der Angriffspunkt der Kraft 1 Newton (1 N) in Richtung der Kraft um den Weg 1 m verschoben wird (1 J = 1 Nm).

Wir müssen uns daran gewöhnen, im Ergebnis einer Rechnung nicht das Newtonmeter (Nm) als Einheit einzusetzen, sondern das Joule (J). Man hat für die mechanische Arbeit, die elektrische Arbeit, die Wärmemenge und die Energie die gleiche Einheit festgelegt, das Joule (J), weil es sich um physikalische Größen gleicher Art handelt.

Bei schräg am Körper angreifenden Kräften (Abb.2) werden häufig Fehler gemacht. Zur Berechnung der aufgebrauchten Arbeit  $W$  dürfen wir in solchen Fällen nur die Kraftkomponente einsetzen, die tatsächlich Arbeit verrichtet. Das ist stets nur die **in Bewegungsrichtung fallende Kraftkomponente**, hier die Kraft  $F \cdot \cos \alpha$ . Die zweite Komponente  $F \cdot \sin \alpha$  drückt den Körper auf seine Unterlage, ohne ihn zu verschieben. Mit ihr wird also keine Arbeit im Sinne der Begriffsbestimmung aufgebracht.

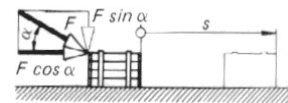


Abb.2: Arbeit  $W$  einer schräg wirkenden Kraft

Fallen Kraft- und Wegrichtung nicht zusammen, muß mit der **Kraftkomponente** gerechnet werden, die in die **Bewegungsrichtung** fällt.

$$W = F \cdot \cos \alpha \cdot s$$

$W$ : Arbeit in J

$F$ : Kraft in N

$\alpha$ : Winkel zwischen Kraftrichtung und Wegrichtung in  $^\circ$

$s$ : Weg in m

## 1.2 Zeichnerische Darstellung der Arbeit

Tragen wir die Kraft  $F$  über dem Weg  $s$  in einem rechtwinkligen Achsenkreuz auf, so erhalten wir das Kraft-Weg-Diagramm ( $F,s$ -Diagramm).

Bei konstanter Kraft  $F$  ist die Kraftlinie eine zur  $s$ -Achse parallele Gerade. Die Fläche  $A$  unter der Kraftlinie (Abb.3) ist dann ein Rechteck mit dem Flächeninhalt  $A = F \cdot s$ , und wir erkennen:

In jedem  $F,s$ -Diagramm entspricht die Fläche  $A$  unter der Kraftlinie der von der Kraft  $F$  aufgebrauchten Arbeit  $W$ .

Abb.3:  $F,s$ -Diagramm (Arbeitsdiagramm) bei konstanter Kraft  $F$

Das ist eine wichtige Erkenntnis, denn wir können jetzt auch die Arbeit  $W$  einer veränderlichen Kraft  $F$  berechnen.

Wir zerlegen in solchen Fällen die Gesamtfläche in berechenbare Teilflächen (Rechtecke, Trapeze, Dreiecke) (Abb.4) und erhalten die Gesamtarbeit als Summe der Teilarbeiten.

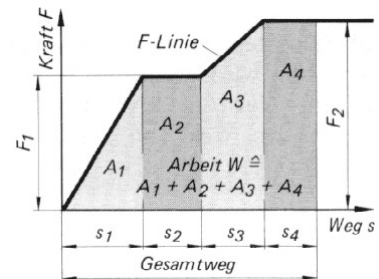


Abb.4:  $F,s$ -Diagramm einer veränderlichen Kraft  $F$

## 1.3 Federarbeit $W_f$ (Formänderungsarbeit) als Arbeit einer veränderlichen Kraft

Wichtigstes Beispiel für die Arbeit einer veränderlichen Kraft ist die zur Formänderung einer Feder aufzubringende Arbeit  $W_f$  (Federarbeit).

Bei den meisten Federn steigt die zur Formänderung erforderliche Kraft von Null gleichmäßig (linear) an. Die Kraftlinie ist eine ansteigende Gerade, sie heißt auch **Federkennlinie**.

Nehmen wir an, eine schon vorgespannte Schraubenzugfeder (Abb.5) soll um  $\Delta s$  verlängert werden. Dann steigt die dazu erforderliche Zugkraft von  $F_1$  auf  $F_2$  an. Die Fläche unter der Federkennlinie hat Trapezform, das heißt, wir können die Federarbeit aus  $W_f = (F_1 + F_2) \cdot \Delta s / 2$  berechnen.

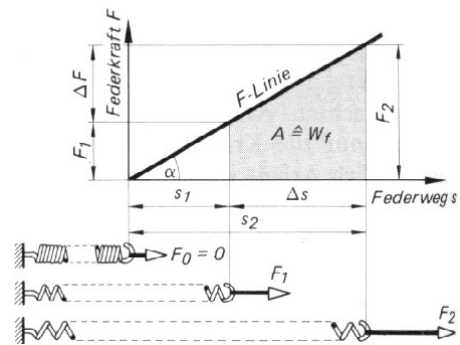


Abb.5: Federarbeit (Formänderungsarbeit)  $W_f$  beim Spannen einer Schraubenzugfeder

Die **Federsteifigkeit  $c$**  gibt an, welche Kraft  $F$  für einen Federweg  $s = 1 \text{ mm}$  erforderlich ist.

$$c = \frac{F}{s}$$

- $F$ : Federkraft in N  
 $s$ : Federweg in mm  
 $c$ : Federsteifigkeit in N/mm

Meistens ist die Federsteifigkeit  $c$  (Federrate) der Feder bekannt, oder sie wird durch einen Versuch bestimmt.



Mit der Federsteifigkeit  $c = F_1/s_1 = F_2/s_2$  und daraus  $F_1 = c \cdot s_1$  sowie  $F_2 = c \cdot s_2$  können wir eine Gleichung für die Federarbeit  $W_f$  entwickeln, in der nur die Federsteifigkeit  $c$  und die Federwege  $s_1$ ,  $s_2$  enthalten sind. Wie die Entwicklung zeigt, ergibt sich das Binom  $(s_2 + s_1) \cdot (s_2 - s_1) = s_2^2 - s_1^2$ .

Setzen wir in Rechnungen die Federsteifigkeit in N/mm und den Federweg  $s$  in mm ein, dann erhalten wir die **Federarbeit  $W_f$**  in Nmm.

Um die gesetzliche Einheit für die Arbeit, also das Joule (J) zu erhalten, müssen wir mit  $1 \text{ Nm} = 10^3 \text{ Nmm}$  umrechnen.

Natürlich können wir auch gleich die Federsteifigkeit  $c$  in N/m und den Federweg  $s$  in m einsetzen.

$$W_f = \frac{c}{2} \cdot (s_2^2 - s_1^2)$$

**Federarbeit**

## 1.4 Aufgaben mit der Größe Arbeit

### Aufgabe 1:

Ein Wagen von der Masse  $m = 400 \text{ kg}$  soll auf eine um  $h = 2,4 \text{ m}$  höher liegende Rampe (Abb.6) gebracht werden. Das soll geschehen

- mit Hilfe eines Kranes,
- durch Verschieben auf einer unter  $\alpha = 30^\circ$  geneigten Fahrbahn

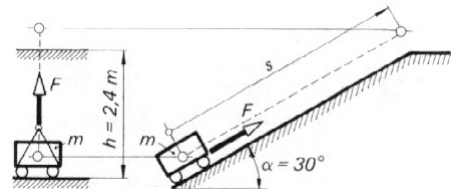


Abb.6: Wagen an Rampe

Im Fall b) soll die Verschiebekraft  $F$  parallel zur schiefen Ebene wirken. Die Reibung soll unberücksichtigt bleiben (gering Rollreibung).

Für beide Fälle ist die aufzubringende Arbeit  $W$  zu bestimmen.

### Lösung 1:

- Bei Kranen und anderen Senkrechtfördergeräten spricht man von **Hubarbeit  $W_h$** .

Da hier die Seilkraft  $F$  gleich der konstanten Gewichtskraft  $G = mg$  zu überwinden ist, gilt:

$$W_h = m \cdot g \cdot h$$

**Hubarbeit**

Wichtig ist die Erkenntnis, daß für horizontale Bewegungen des Kranes mit der Last keine Hubarbeit aufgebracht werden muß, weil keine Höhendifferenz zu überwinden ist ( $\Delta h = 0$ ).

- Wir beginnen mit der Skizze des freigemachten Wagens (Lageskizze) und entwickeln daraus die Kräfteckschizze. Schon hier erkennen wir, daß die zum Verschieben des Wagens erforderliche Kraft  $F$  gleich der Gewichtskraftkomponente  $G \cdot \sin \alpha$  ist. Diese Komponente heißt auch *Hangabtriebskomponente* der Gewichtskraft  $G$ .

Zu Übungszwecken setzen wir noch einmal die beiden Gleichgewichtsbedingungen an (Achsenkreuz um  $\alpha$  zur Waagerechten gedreht).

Mit  $F = G \cdot \sin\alpha$  haben wir die in Wegrichtung fallende Verschiebekraft (Kraft- und Wegrichtung müssen zusammenfallen!).

Den Verschiebeweg  $s$  können wir mit Hilfe der Sinusfunktion aus der Hubhöhe  $h$  bestimmen ( $s = h / \sin\alpha$ )

Da auch hier die Verschiebekraft konstant ist, gilt die einfache Beziehung: Arbeit ist gleich Kraft mal Weg.

Die Rechnung führt uns zum gleichen Ergebnis wie im Fall des Kranes ( $\sin\alpha$  kürzt sich heraus). Das heißt:

Es ist gleichgültig, auf welchem Weg eine Last auf eine höhere Ebene gebracht wird. Stets ist dazu die Hubarbeit  $W_h = \text{Gewichtskraft } G \text{ mal Hubhöhe } h$  erforderlich.

Horizontale Verschiebungen einer Last haben keinen Einfluß auf die Hubarbeit.

**Beachte:**

Beim Verschieben einer Last auf einer schiefen Ebene wird nichts an mechanischer Arbeit gespart. Zwar wird die Verschiebekraft umso kleiner, je kleiner der Neigungswinkel  $\alpha$  der schiefen Ebene ist, umso größer wird dann jedoch der Verschiebeweg. Das Produkt aus beiden ist immer wieder gleich der Hubarbeit.

**Aufgabe 2:**

Ein Werkstück von der Masse  $m = 10 \text{ kg}$  soll auf horizontaler Bahn durch die Kraft  $F$  mit konstanter Geschwindigkeit  $v$  um den Weg  $s_R = 2 \text{ m}$  verschoben werden (Abb.7). Die Kraft  $F$  greift unter dem Winkel  $\alpha = 30^\circ$  zur Horizontalen an.

Die Gleitreibzahl zwischen Werkstück und Unterlage beträgt  $\mu = 0,25$ . Gesucht wird eine Gleichung für die Reibarbeit  $W_R$  und deren Betrag.

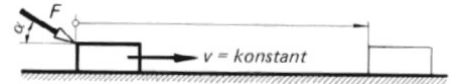


Abb.7: Werkstück mit Reibung

**Lösung 2:**

Zunächst wollen wir festlegen, was unter Reibarbeit zu verstehen ist:

Reibarbeit  $W_R$  ist das Produkt aus der konstanten Reibkraft  $F_R$  und dem Reibweg  $s_R$ .

$$W_R = F_R \cdot s_R$$

$$W_R = F_N \cdot \mu \cdot s_R$$

$W_R$  : Reibarbeit in J

$F_R$  : Reibkraft in N

$F_N$  : Normalkraft in N

$\mu$  : Gleitreibzahl

$s_R$  : Reibweg in m

Unsere erste Aufgabe ist es, eine Beziehung für die Normalkraft  $F_N$  zu entwickeln. Wir erhalten sie aus den Gleichgewichtsbedingungen für das freigemachte Werkstück, indem wir sowohl  $\Sigma F_x = 0$  als auch  $\Sigma F_y = 0$  nach  $F$  auflösen und dann die beiden Gleichungen gleichsetzen.

Mit der Beziehung für die Normalkraft  $F_N$  erhalten wir die gesuchte Funktionsgleichung  $W_R = W_R(m, g, \mu, \alpha, s_R)$ .

Das Endergebnis schreiben wir mit der Einheit Joule (J), weil dies die gesetzliche Einheit für die Arbeit ist ( $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$ ).

**Aufgabe 3:**

Eine Feder besitzt eine Federrate von  $8 \text{ N/mm}$ . Die Feder wird um  $70 \text{ mm}$  zusammengedrückt.

- Wie groß ist die Federkraft im gespannten Zustand?
- Wie groß ist die von der Feder aufgenommene Formänderungsarbeit?

**Aufgabe 4:**

Der Schrägaufzug einer Ziegelei hat eine Steigung von  $23^\circ$  und ist  $38 \text{ m}$  lang. Es werden Kippwagen mit einer Gesamtmasse von  $2500 \text{ kg}$  mit konstanter Geschwindigkeit gefördert. Die Gleitreibzahl ist  $0,08$ .

- Wie groß ist die Zugkraft für einen parallel zur Förderachse bewegten Wagen?
- Wie groß ist die Förderarbeit für den Wagen?



## 2 Leistung

### 2.1 Begriffserklärung

Kennen wir die mechanische Arbeit  $W$ , die zur Ortsveränderung eines Körpers erforderlich ist, dann ist damit noch nichts über die Zeit ausgesagt, in der diese Arbeit verrichtet wird. Gerade das aber muß man in der Technik wissen, weil man zeitlich planen muß. Man hat daher die in der Zeiteinheit (1 s) verrichtete Arbeit als besondere Größe festgelegt:

Die **Leistung  $P$**  ist der Quotient aus der verrichteten Arbeit  $W$  und der dazu erforderlichen oder verwendeten Zeit  $t$ .

(Leistung gleich Arbeit durch Zeit).

Die Leistung ist ein Skalar.

$$P = \frac{W}{t}$$

#### Beispiel:

Zum Heben einer Last ist eine Hubarbeit  $W_h = 10000 \text{ J}$  erforderlich.

Zur Planung muß man wissen, ob diese Arbeit mit den vorhandenen Geräten in einer Stunde oder in einer Minute „gewährleistet“ werden kann.

$$P: \text{ Leistung in } W = \frac{J}{s} = \frac{Nm}{s}$$

$W$ : Arbeit in J

$t$ : Zeit in s

Die gesetzliche und internationale Einheit der Leistung  $P$  ist das Watt  $W$ :

Die Einheit Watt wurde nach dem englischen Erfinder der ersten brauchbaren Dampfmaschine James Watt (1736-1819) benannt.

1 Watt (Kurzzeichen  $W$ ) ist gleich der Leistung, bei der während der Zeit 1 s die Arbeit 1 J umgesetzt wird.

Nach dem Einheitengesetz dürfen wir durch Vorsetzen von Vorsilben (**Vorsätze** genannt) dezimale Teile und Vielfache von Einheiten bilden, und zwar von Basiseinheiten und von Einheiten mit einem selbständigen Namen. Das Watt  $W$  ist eine solche Einheit. Ebenso das Newton  $N$ , das Joule  $J$ , das Coulomb  $C$ , das Volt  $V$ , das Farad  $F$  usw.

#### Vorsatzzeichen, -namen und -bedeutung:

$10^{24}$ = Yotta (Y)	$10^{-1}$ = Dezi (d)
$10^{21}$ = Zetta (Z)	$10^{-2}$ = Zenti (c)
$10^{18}$ = Exa (E)	$10^{-3}$ = Milli (m)
$10^{15}$ = Peta (P)	$10^{-6}$ = Mikro ( $\mu$ )
$10^{12}$ = Tera (T)	$10^{-9}$ = Nano (n)
$10^9$ = Giga (G)	$10^{-12}$ = Pico (p)
$10^6$ = Mega (M)	$10^{-15}$ = Femto (f)
$10^3$ = Kilo (k)	$10^{-18}$ = Atto (a)
$10^2$ = Hekto (h)	$10^{-21}$ = Zepto (z)
$10^1$ = Dekka (da)	$10^{-24}$ = Yocto (y)

Mit der Gleichung  $P = W/t$  berechnen wir die mittlere Leistung während eines Zeitabschnittes  $t$ , denn wir wissen nicht, ob beispielsweise in der dritten Sekunde ebensoviel Arbeit verrichtet worden ist wie bspw. in der zwölften Sekunde.

#### Beispiel:

Ein Kran hebt einen Körper von der Masse  $m = 600 \text{ kg}$  auf  $h = 5 \text{ m}$  Höhe. Der Vorgang dauert 100 s. Die Hubgeschwindigkeit  $v$  ändert sich dabei mehrfach.



Das Endergebnis schreiben wir mit der Einheit Watt (W), weil dies die gesetzliche Einheit für die Leistung ist ( $1 \text{ Nm/s} = 1 \text{ W}$ ).

Sind die Arbeitsbeträge je Sekunde verschieden groß, dann gilt das auch für die Leistungen.

Das kann zwei Ursachen haben:

Entweder ist die Kraft  $F$ , welche die Arbeit verrichtet, nicht konstant, oder

es werden in gleichen Zeiten verschiedene Wege zurückgelegt, d. h. die Geschwindigkeit  $v$  ist nicht konstant.

Es kann auch beides zugleich der Fall sein.

Mit der Arbeitsdefinition  $W = Fs$  und der Gleichung für die konstante Geschwindigkeit  $v = s/t$  erhalten wir:

$$\text{Leistung } P = \text{Kraft } F \times \text{Geschwindigkeit } v$$

Aus der Definitionsgleichung für die Leistung  $P = W / t$  können wir eine Gleichung für die Momentanleistung entwickeln, die unbeschränkt angewendet werden kann.

Die **Leistung  $P$**  ist das Produkt aus der Verschiebekraft  $F$  und der Verschiebegeschwindigkeit  $v$ .  
(Leistung gleich Kraft mal Geschwindigkeit).

$$P = F \cdot v$$

$P$ : Leistung in W

$F$ : Kraft in N

$v$ : Geschwindigkeit in m/s

**Beachte:**

Wie bei der mechanischen Arbeit  $W$  Kraft- und Wegrichtung übereinstimmen müssen, so müssen auch bei der mechanischen Leistung die Wirklinien von Kraft  $F$  und Geschwindigkeit  $v$  zusammenfallen.

Wir prägen uns die Definitionen der beiden technisch wichtigen Größen Arbeit  $W$  und Leistung  $P$  besser ein, wenn wir sie untereinander stehend vor Augen haben.

Wir erkennen:

**W** enthält die **Zeit  $t$  nicht**,

**P** dagegen ist geschwindigkeits-, und daher **zeitabhängig**.

Entsprechend den speziellen Bezeichnungen für die mechanischen Arbeitsformen kennzeichnet man auch die Leistung.

$$\text{Arbeit } W = \text{Kraft } F \cdot \text{Weg } s$$

$$\text{Leistung } P = \text{Kraft } F \cdot \text{Geschwindigkeit } v$$

**Beispiele:**

$$\text{Hubleistung } P_h = \text{Hubarbeit } W_h / \text{Zeit } t$$

$$\text{Reibleistung } P_R = \text{Reibarbeit } W_R / \text{Zeit } t$$

## 2.2 Aufgaben mit der Größe Leistung

### Aufgabe 5:

Auf einer Dreifach-Ziehbank können gleichzeitig 3 Stahlrohre von 20 m Länge gezogen werden. Die reine Ziehzeit beträgt 30 s. Für ein Rohr wird eine Zugkraft von 120 kN benötigt.

- Wie groß ist die Arbeit zum Ziehen der drei Rohre?
- Wie groß ist die Leistung, die die Antriebskette übertragen muß.

### Aufgabe 6:

Ein Senkrechtförderer (Elevator) fördert ein Schüttgut mit einer Dichte von  $1200 \text{ kg/m}^3$  auf eine Höhe von 12 m. In einer Stunde werden  $160 \text{ m}^3$  gefördert.

Wie groß ist die Förderleistung?



### 3 Wirkungsgrad

#### 3.1 Begriffserklärung

Kein technischer Vorgang läuft verlustfrei ab.

Ein Teil der aufgebrauchten Arbeit (oder Leistung) geht für den eigentlichen Zweck verloren. In technischen Maschinen und Vorrichtungen ist das vor allem die Reibarbeit (oder Reibleistung) infolge der unvermeidlichen Reibung zwischen den Maschinenteilen. Die Reibarbeit wird dabei in Wärme umgewandelt, spürbar in der Temperaturerhöhung der festen, flüssigen und gasförmigen Stoffteilchen.

Zur Beurteilung der Verluste in einzelnen Maschinenteilen, in Maschinen und Vorrichtungen hat man den Wirkungsgrad definiert:

Der **Wirkungsgrad**  $\eta$  ist das Verhältnis der Nutzarbeit  $W_n$  (Nutzleistung  $P_{ab}$ ) zur zugeführten Arbeit  $W_a$  (zugef. Leistung  $P_{zu}$ )

$$\eta = \frac{W_{ab}}{W_{zu}} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} < 1$$

$\eta$ : Wirkungsgrad (ohne Einheit)

$W_{ab}$ : Nutzarbeit in J

$W_{zu}$ : Aufgewendete oder zugeführte Arbeit in J

$P_{ab} = P_2$ : Nutzleistung oder Abtriebsleistung in W

$P_{zu} = P_1$ : Aufgewendete Leistung oder zugeführte Leistung in W

Es ist üblich, die aufgewendete Leistung  $P_{zu}$  als **Antriebsleistung** oder **zugeführte Leistung** zu bezeichnen und mit dem Index 1 zu kennzeichnen ( $P_{zu} = P_1$ ).

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_2}{P_1}$$

Die Nutzleistung  $P_{ab}$  wird als **Abtriebsleistung** mit  $P_2$  bezeichnet ( $P_{ab} = P_2$ ).

Meistens setzt man nicht die Arbeiten, sondern die Leistungen ins Verhältnis.

Am Beispiel eines einfachen Getriebes (Abb.1) wollen wir untersuchen, wie sich der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges}$  einer Anlage aus den Einzelwirkungsgraden zusammensetzt.

Die Antriebsleistung  $P_{zu} = P_1$  wird durch die Lagerverluste in den Lagern 1 und 2 vermindert auf  $\eta_{Lg1,2} \cdot P_1$ .

Das ist zugleich die neue Antriebsleistung, die in den Zahneingriff einfließt und dort verringert wird auf  $\eta_{Lg1,2} \cdot \eta_z \cdot P_1$ . Dieser Leistungsbetrag wiederum wird in den Lagern 4 und 5 auf  $\eta_{Lg1,2} \cdot \eta_z \cdot \eta_{Lg4,5} \cdot P_1$  reduziert. Das ist die Abtriebsleistung  $P_{ab} = P_2$ .

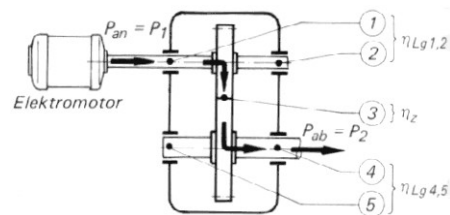


Abb.1: Getriebe

**Gesamtwirkungsgrad:**

Mit der Ausgangsgleichung  $\eta = P_2/P_1$  erhalten wir dann  $\eta_{ges} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_2}{P_1} = \eta_{Lg1,2} \cdot \eta_z \cdot \eta_{Lg4,5}$  abschließend die Beziehung für den Gesamtwirkungsgrad.

Diese Erkenntnis können wir allgemein fassen:

Der **Gesamtwirkungsgrad**  $\eta_{ges}$  einer Maschine, einer Anlage oder eines physikalischen Vorganges ist das Produkt der Einzelwirkungsgrade.

$$\eta_{ges} = \prod_{i=1}^n \eta_i < 1$$

$\eta_{ges}$ : Gesamtwirkungsgrad

$\eta_i$ : Einzelwirkungsgrad

Man gibt den Wirkungsgrad nicht nur als Dezimalzahl an, z.B.  $\eta_{ges} = 0,86$ , sondern auch als Prozentzahl, z.B.  $\eta_{ges} = 86\%$ .

**Beispiele für Wirkungsgrade:**

Gleitlager  $\eta = 0,98$

Verzahnung:  $\eta = 0,98$

E-Motor:  $\eta = 0,90$

Ottomotor:  $\eta = 0,25$



### 3.2 Aufgaben mit den Größen Arbeit, Leistung, Wirkungsgrad

#### Aufgabe 7:

Beim Zerspanen auf einer Drehmaschine wird mit dem Schnittkraftmeßgerät die Schnittkraft  $F_c = 5000 \text{ N}$  (Abb.2) gemessen. Werkstückdrehzahl und -durchmesser ergeben eine Schnittgeschwindigkeit (Umfangsgeschwindigkeit) von  $v_u = 60 \text{ m/min}$ .

Der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{\text{ges}}$  der Drehmaschine von Elektromotor bis zur Zerspanungsstelle  $z$  wird mit 78 % angenommen.

Es ist die Antriebsleistung  $P_{\text{Mot}}$  für den Motor zu bestimmen.

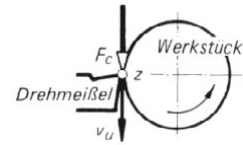


Abb.2: Kraft beim Zerspanen

#### Aufgabe 8:

Ein Kran hebt eine Last (Abb.3) von der Masse  $m = 2 \text{ t}$  mit einer Hubgeschwindigkeit  $v = 0,25 \text{ m/s}$ . Der Antriebsmotor entnimmt dabei dem elektrischen Netz die Leistung  $P_{\text{Netz}} = 7 \text{ kW}$ , sein Wirkungsgrad beträgt  $\eta_{\text{Mot}} = 0,9$ .

Es ist der Wirkungsgrad  $\eta_{\text{Anlage}}$  der restlichen Maschinenteile vom Motorritzel bis zum Kranhaken zu bestimmen.

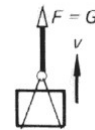


Abb.3: Kranlast

#### Aufgabe 9:

Zur Wasserhaltung eines Schachtes sind 24stündlich  $1250 \text{ m}^3$  Wasser aus einer Tiefe von  $830 \text{ m}$  an die Oberfläche zu pumpen. Der Wirkungsgrad der Pumpe mit Rohrnetz beträgt 72 %, der des Elektromotors 90 %.

- Wie groß ist die Abtriebsleistung des Elektromotors?
- Wie viel Energie zieht der Motor während 30 Minuten aus dem Netz?

#### Aufgabe 10:

Ein Förderband von  $10 \text{ m}$  Länge läuft mit einer Bandgeschwindigkeit von  $1,8 \text{ m/s}$ . Es fördert unter einem Steigungswinkel von  $12^\circ$ . Der Antriebsmotor gibt  $4,4 \text{ kW}$  ab, der Gesamtwirkungsgrad der Förderanlage beträgt 0,65.

- Wie groß ist die Masse des Fördergutes, das bei voller Ausnutzung der Antriebsleistung auf dem Band liegen kann?
- Wie groß ist die Fördermenge in  $\text{kg/h}$ ?

## 4 Impuls

### 4.1 Impuls und Kraftstoß

#### 4.1.1 Impuls

Die Bewegung eines Körpers wird beispielsweise durch die Geschwindigkeit beschrieben. Um die Bewegung eines Körpers zu ändern braucht man eine Kraft (Abb.1). Diese führt zu einer Änderung der Geschwindigkeit. Die **neue Geschwindigkeit** hängt neben der **Größe der Kraft** auch von der **Masse des Körpers** ab:

Um den Bewegungszustand eines Körpers zu beschreiben verwendet man eine weitere Größe, den **Impuls**.

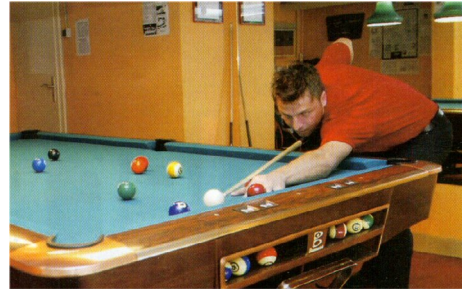


Abb.1: Geschwindigkeitsänderungen beim Billiard

Der **Impuls**  $\vec{p}$  kennzeichnet den Bewegungszustand eines Körpers.

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

$\vec{p}$  : Impuls in Ns

m: Masse in kg

$\vec{v}$  : Geschwindigkeit in m/s

Der Impuls ist eine **vektorielle Zustandsgröße**.

#### Beispiel:

Ein Meteorit mit der Masse 1 g dringt mit einer Geschwindigkeit von 30 km/s (Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne) in die Atmosphäre.

Die Geschwindigkeit eines PKWs von 1 t beträgt 110 km/h.

Berechne die kinetischen Energien und die Impulse der beiden Körper.

#### Lösung:



### 4.1.2 Kraftstoß

Liegt beim Billiard eine Kugel ruhig auf dem Tisch, hat sie den Impuls  $p = 0$ . Der Stoß mit der Queue verändert den Impuls der Kugel. Der resultierende Impuls ist umso größer, je größer die wirkende **Kraft** ist und je **länger** sie wirkt. Dies wird durch die physikalische Größe **Kraftstoß** beschrieben.

Der **Kraftstoß**  $\vec{S}$  errechnet sich aus der Dauer und der Größe einer Kraftwirkung.

$$\vec{S} = \vec{F} \cdot \Delta t$$

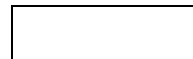
$\vec{S}$  : Kraftstoß in Ns  
 $\vec{F}$  : Kraft in N

Der Kraftstoß ist eine **vektorielle Prozessgröße**.

$\Delta t$ : Dauer der Krafteinwirkung in s

Kraftstoß und Impuls werden in der gleichen Einheit gemessen. Der Impuls kennzeichnet den Bewegungszustand eines Körpers. Der Kraftstoß beschreibt den Vorgang oder Prozess der Bewegungsänderung.

Der **Kraftstoß** ist gleich der erzielten **Impulsänderung**.



### 4.1.3 Impuls als Erhaltungsgröße

Kraftstöße und Impulsänderungen treten beispielsweise beim Rangieren von Eisenbahnwagen auf.

Betrachten wir zwei Kugeln 1 und 2 mit den Massen  $m_1$  bzw.  $m_2$  und den Geschwindigkeiten  $v_1$  bzw.  $v_2$ , die aufeinander prallen (Abb.2). Nach dem Aufprall sollen die Geschwindigkeiten  $u_1$  bzw.  $u_2$  betragen.

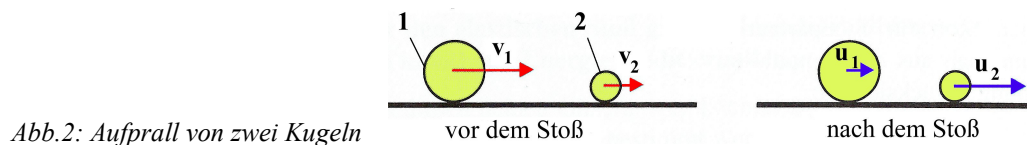


Abb.2: Aufprall von zwei Kugeln

Entsprechend dem **Wechselwirkungsgesetz** wirken gleich große, entgegengesetzte Kräfte  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_2$  beim Prall. Die Dauer des Aufpralls ist für beide Kugeln gleich groß.

Es gilt für die Kraftstöße:

Daraus die Impulsänderung:

Man erkennt, dass der Gesamtimpuls der Kugeln vor dem Stoß gleich dem Gesamtimpuls nach dem Stoß ist. Es gilt das allgemein gültige **Impulserhaltungsgesetz** für mechanische Systeme:

#### Impulserhaltungssatz:

Ist bei einem System die Summe aller von außen angreifenden Kräften gleich null, so ist die Vektorsumme aller Impulse konstant.

$$\sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{v}_i = \sum_{j=1}^m m_j \cdot \vec{u}_j$$

$m_i$ : Masse des Körpers  $i$  in kg

$m_j$ : Masse des Körpers  $j$  in kg

$\vec{v}_i$ : Geschwindigkeit vor dem Stoß in m/s

$\vec{u}_j$ : Geschwindigkeit nach dem Stoß in m/s

Der Impuls ist eine **Erhaltungsgröße**.



## 4.2 Stoßprozesse

Stoßprozesse lassen sich nach der Art der **Verformung** und nach der **Richtung**, bezogen auf die Bewegungsrichtung, unterscheiden.

- Bei der Verformung unterscheidet man die Grenzfälle **elastischer** und **unelastischer** Stoß:

**Unelastische Stöße** führen zu **bleibenden Verformungen**. Bsp.: Einschlagen eines Nagels, Schmieden von Eisen.

**Elastische Stöße** treten nur **elastische Verformungen** auf. Bsp.: Ballspiele

- Die Richtung unterscheidet man **zentrale** und **schiefe** Stöße.

### 4.2.1 Zentraler unelastischer Stoß

Wenn die an einem Stoßvorgang beteiligten Körper unelastisch sind, verformen sie sich an der Berührungsstelle. Sie bewegen sich dann mit gemeinsamer Geschwindigkeit weiter.

Für die Geschwindigkeiten nach dem Stoß gilt somit:  $u_1 = u_2 = u$

Zur Vereinfachung wird zukünftig die Vektorschreibweise nicht mehr verwendet. Die Geschwindigkeiten und Kräfte müssen entsprechend ihrem Richtungssinn mit dem richtigen Vorzeichen versehen werden.

Aus dem **Impulserhaltungssatz** folgt:

Geschwindigkeit nach dem **zentralen unelastischen Stoß**:

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

Berechnung der **kinetischen Energien**:

Vor dem Stoß:

Nach dem Stoß:

**Differenz** der kinetischen Energien:

Erklärung: Ein Teil der kinetischen Energie wird in Verformungs- und thermische Energie umgewandelt (Abb.3).

**Die kinetische Energie bleibt beim unelastischen Stoß nicht erhalten.**

Abb.3: Zentraler unelastischer Stoß



#### 4.2.2 Schiefer unelastischer Stoß

Betrachten wir einen Skateboard-Fahrer, der schräg zur Fahrtrichtung auf sein stehendes Brett aufspringt (Abb.4).

Der **Impuls** des Skaters kann vektoriell in eine Richtung senkrecht und eine in Fahrtrichtung zerlegt werde. Die entsprechenden Beträge sind  $m_1 \cdot v_s = m_1 \cdot v \cdot \sin\alpha$  und  $m_1 \cdot v_p = m_1 \cdot v \cdot \cos\alpha$ .

Beim Impuls **senkrecht zur Fahrtrichtung** handelt es sich um einen **zentralen unelastischen Stoß**: das Skateboard kann sich nicht in diese Richtung bewegen. Die Energie wird von den Gummirädern aufgenommen.

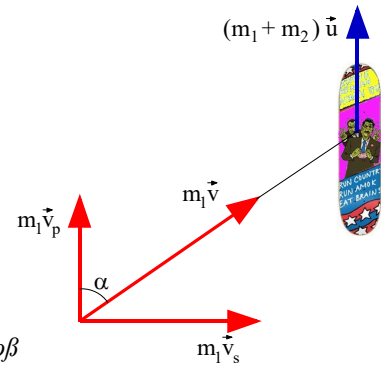


Abb.4: Schiefer Stoß

Der Impuls **in Fahrtrichtung** stellt ebenfalls einen zentralen unelastischen Stoß dar: Fahrer und Skateboard bewegen sich gemeinsam mit gleicher Geschwindigkeit weiter.

Daher gilt:

Geschwindigkeit nach dem Aufspringen:

##### Anmerkung:

Die maximale Geschwindigkeit  $u$  erhält man bei  $\alpha = 0^\circ$ .

#### 4.2.3 Zentraler elastischer Stoß

Beim zentralen elastischen Zusammenprall findet ein Energie- und Impulsaustausch statt (Abb.5).

Beide Körper haben nach dem Stoß eine nach Betrag und Richtung veränderte Geschwindigkeit.



Abb.5: Zentraler elastischer Stoß

Die Summe der **kinetischen Energien** vor und nach dem Stoß bleiben erhalten. Es gilt:

Aus dem **Impulserhaltungssatz** folgt:

Gleichung (1) geteilt durch (2):

Die Geschwindigkeit  $u_2$  eingesetzt in Gl.(2):

In gleicher Weise berechnet sich die Geschwindigkeit  $u_2$ .

Geschwindigkeiten nach dem **zentralen elastischen Stoß**:

$$u_1 = \frac{2 \cdot m_2 \cdot v_2 + (m_1 - m_2) \cdot v_1}{m_1 + m_2}$$

$$u_2 = \frac{2 \cdot m_1 \cdot v_1 + (m_2 - m_1) \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

#### 4.2.4 Sonderfälle des elastischen Stoßes

##### Fall 1:

Die **Massen** der beiden Körper sind **gleich groß**. Ein Körper (z.B. Index 2) **ruht** vor dem Zusammenprall (z.B. zwei Billiardkugeln).

Aus den Gleichungen im Abschnitt 4.2.3 ergibt sich:

**Der ruhende Körper übernimmt die Geschwindigkeit des bewegten Körpers, dieser bleibt liegen.**

##### Fall 2:

Die **Masse** des anfangs **ruhenden** Körpers (z.B. Index 2) ist sehr **klein** gegenüber dem bewegten Körper (z.B. Aufschlag beim Tennis)

Aus den Gleichungen im Abschnitt 4.2.3 ergibt sich:

**Der ruhende Körper erhält die doppelte Geschwindigkeit des bewegten Körpers, dieser verändert seine Geschwindigkeit nicht.**

##### Fall 3:

Die **Masse** des anfangs **ruhenden** Körpers (z.B. Index 2) ist viel **größer** als die des bewegten Körper (z.B. Aufprall eines Balls gegen eine Wand)

Aus den Gleichungen im Abschnitt 4.2.3 ergibt sich:

**Der Geschwindigkeit des bewegten Körpers bleibt erhalten, die Richtung ändert. Der ruhende Körper bleibt unbewegt.**



### 4.3 Aufgaben zu Stoßprozessen

#### Aufgabe 1:

Ein Güterwagen der Masse 3,2 t rollt mit 5 m/s unter der Ladevorrichtung durch, in der 10 t Steinkohle auf den durchrollenden Wagen gekippt werden.

Welche Geschwindigkeit hat der Wagen nach dem Beladen?

#### Aufgabe 2:

Eine Kugel der Masse 1 g trifft auf einen Pendel der Masse 0,6 kg und prallt ab. Der Pendel schwingt aus und erreicht eine maximale Höhe von 10 mm.

Welche Geschwindigkeit hatte die Kugel?

#### Aufgabe 3:

Eine Kugel der Masse 900 g trifft gerade mit 10 m/s gegen eine ruhende Kugel der Masse 10 kg.

Welche Geschwindigkeiten haben beide Kugeln nach einem elastischen Stoß? Berechne den exakten Wert und berechne mit einer angenäherten Formel.

### 4.4 Aus Wissenschaft und Technik

#### Raketen:

Die Verbrennungsgase treten mit hoher Geschwindigkeit aus der Rakete (Abb.6), aufgrund des Impulserhaltungssatzes bewegt sich die Rakete nach vorne. Da der durch den Kraftstoß während der gesamten Brennzeit wirkt, ändert sich der Impuls der Rakete permanent: die Geschwindigkeit nimmt kontinuierlich zu.



Abb.6: Arian 6

#### Oktopus:

Der Rückstoß-Antrieb der Rakete funktioniert auch im Wasser. Viele Meerestiere (Quallen, Muscheln, Tintenfische) nutzen ihn aus.

Der Oktopus beispielsweise (Abb.7) presst bei Gefahr blitzartig einen Wasserstrahl durch seinen Siphon und kann dadurch schnell davon schwimmen.

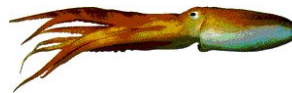


Abb.7: Oktopus

#### Feuerwehrschauch:

Je mehr Wasser in kurzer Zeit in den Brandherd kommt, desto schneller kommt ein Feuer zum Erliegen. Heutzutage pumpen Löschwagen minütlich bis zu 3200 l Wasser mit ca. 25 m/s. Welche Gegenkraft ist bei 4 angeschlossenen Rohren pro Strahlrohr (Abb.8) erforderlich?



Abb.8: Feuerwehrschauch

## 5 Gleichförmige Rotation (Kreisbewegung)

### 5.1 Definitionen zur Kinematik der Rotation

#### 5.1.1 Bahngeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit

Die bei der Rotationsbewegung (Abb.1) geltenden Gesetze sind analog definiert wie die Gesetze der Translation (geradlinige Bewegung).



Abb.1: Rotation am Karussell

Betrachten wir einen Massenpunkt P (Abb.2), der sich auf einer Kreisbahn mit Radius r bewegt.

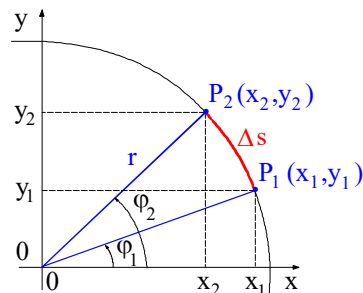


Abb.2: Kreisbewegung

Die momentane **Bahngeschwindigkeit** ist der Quotient aus der zurückgelegten Strecke und der dazu benötigten Zeit (für kleine Zeitintervalle).

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

v: Bahngeschwindigkeit in m/s  
 $\Delta s$ : Länge des Kreisbogens in m  
 $\Delta t$ : Zeitintervall in s

Die Bahngeschwindigkeit ist eine **vektorielle Größe**. Sie hat die Richtung der Tangente an die Kreisbahn, wie man beispielsweise an der Funkenrichtung beim Schleifen (Abb.3) erkennt.



Abb.3: Funken beim Schleifen

Die **Winkelgeschwindigkeit** ist der Quotient aus dem zurückgelegten Drehwinkel und der dazu benötigten Zeit (für kleine Zeitintervalle).

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$$

$\omega$ : Winkelgeschwindigkeit in rad/s  
 $\Delta \varphi$ : Drehwinkel in rad  
 $\Delta t$ : Zeitintervall in s

#### Anmerkung:

Die Winkelgeschwindigkeit ist ebenfalls eine **vektorielle Größe**. Der Vektorpfeil (Abb.4) zeigt in Richtung der Drehachse (axialer Vektor).

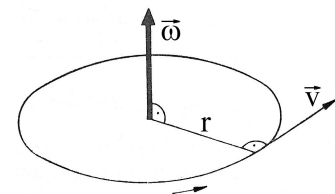


Abb.4: Vektorgröße Winkelgeschwindigkeit

Für den Drehwinkel  $\Delta \varphi$  gilt:

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta s}{r}$$

Umgestellt:

Hieraus kann man herleiten:

Zusammenhang zwischen **Bahngeschwindigkeit** und **Winkelgeschwindigkeit**

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r}$$

### 5.1.2 Zeit-Gesetze

Eine Rotation heißt gleichförmig, wenn in gleichen Zeitabschnitten um gleiche Winkel gedreht wird.

**Weg-Zeit-Gesetz** bei der gleichförmigen Rotation.

$$s(t) = v \cdot t + s_0$$

$s(t)$ : Weg zur Zeit  $t$  in m  
 $v$ : Bahngeschwindigkeit in m/s  
 $t$ : Zeit in s  
 $s_0$ : Weg zur Zeit  $t = 0$  in m

**Drehwinkel-Zeit-Gesetz** bei der gleichförmigen Rotation.

$$\varphi(t) = \omega \cdot t + \varphi_0$$

$\varphi(t)$ : Drehwinkel zur Zeit  $t$  in rad  
 $\omega$ : Winkelgeschwindigkeit in rad/s  
 $t$ : Zeit in s  
 $\varphi_0$ : Drehwinkel zur Zeit  $t = 0$  in rad

### 5.1.3 Periodendauer und Frequenz

Eine Rotation heißt gleichförmig, wenn in gleichen Zeitabschnitten um gleiche Winkel gedreht wird.

Die **Periodendauer** gibt an, wie lange ein Umlauf auf einer Kreisbahn dauert.

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$$

$T$ : Periodendauer in s  
 $2 \cdot \pi$ : Drehwinkel einer Umdrehung ( $360^\circ$ ) in rad  
 $\omega$ : Winkelgeschwindigkeit in rad/s

Die **Frequenz** gibt an, wie häufig eine Kreisbahn umlaufen wird.

$$f = \frac{n}{t}$$

$f$ : Frequenz in  $1/s = \text{Hz}$  (= U/s, U für Umdrehungen)  
 $n$ : Anzahl an Umdrehungen ohne Einheit  
 $t$ : Zeit in s

Daraus ergibt sich:

Zusammenhang zwischen **Frequenz und Periodendauer**

$$f = \frac{1}{T}$$

und:

Zusammenhang zwischen **Winkelgeschwindigkeit und Frequenz**

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

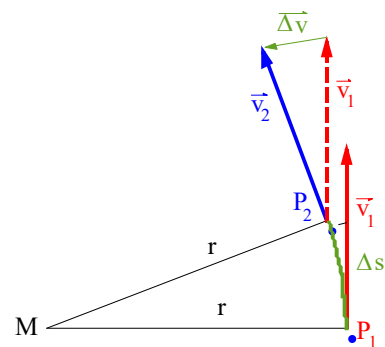
### 5.1.4 Radialbeschleunigung

Da die Bahngeschwindigkeit die **Richtung** der Tangente an die Kreisbahn hat, ändert sie (ihre Richtung!) bei einer Rotation permanent (Abb.5).

Die zeitliche Änderung einer Geschwindigkeit entspricht einer Beschleunigung. Diese bezeichnet man als **Radialbeschleunigung**.

Die Radialbeschleunigung (Abb.6) wirkt **zum Kreismittelpunkt**. Sie wirkt somit senkrecht zur Bahngeschwindigkeit. Der **Betrag der Radialbeschleunigung** ändert nicht. Es findet jedoch ständig eine Änderung ihrer **Richtung** statt.

Abb.5: Änderung der Bahngeschwindigkeit



Bei der Rotation tritt eine zum Kreismittelpunkt gerichtete **Radialbeschleunigung** auf.

$$a_r = \frac{v^2}{r}$$

$a_r$ : Radialbeschleunigung in  $\text{m/s}^2$   
 $v$ : Bahngeschwindigkeit in m/s  
 $r$ : Radius der Kreisbahn in m

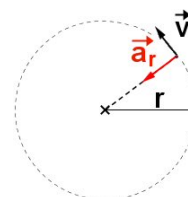


Abb.6: Radialbeschleunigung

## 5.2 Aufgaben zur Kinematik der Rotation

### Aufgabe 1:

Bei der Stromproduktion in einem Wärmekraftwerk dreht sich der Anker des Wechselstromgenerators mit der Frequenz  $50 \text{ s}^{-1}$ . Er hat einen Durchmesser von 1,2 m.

- Wie lange braucht ein Punkt am Umfang für eine ganze Umdrehung.
- Wie groß ist die Wegstrecke, die dieser Punkt nach 5 Sekunden hinterlegt hat?

### Aufgabe 2:

Ein Winkelschleifer soll mit Schleifscheiben von 115 mm betrieben werden. Die Antriebswelle dreht mit 25 Hz.

- Wie groß ist die Winkelgeschwindigkeit der Schleifscheibe?
- Welche Bahngeschwindigkeit hat ein Punkt am äußeren Rand?
- Nach kurzem Betrieb ist die Scheibe auf einen Durchmesser von 100 mm abgenutzt. Wie verhalten sich Winkelgeschwindigkeit und Bahngeschwindigkeit bei weiterem Betrieb.
- Im Baumarkt sind 125er-Scheiben im Angebot. Können diese verwendet werden? Argumentiere.

### Aufgabe 3:

Die Erde bewegt sich in einem Abstand von  $1,49 \cdot 10^{11} \text{ m}$  in einer kreisähnlichen Bahn um die Sonne. Wie groß ist unsere Bahngeschwindigkeit?

## 5.3 Dynamik der Rotation

### 5.3.1 Masse und Kraft

Die Dynamik handelt von den Kräften als Ursache für Bewegungsabläufe. Entscheidende Arbeiten wurden von Gallilei<sup>1)</sup> und Newton<sup>2)</sup> durchgeführt.

#### 1. Axiom von Newton = Trägheitsgesetz:

Ohne äußere Kraftwirkung verharrt ein Körper im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung.

#### 2. Axiom von Newton = Grundgleichung der Mechanik:

Die wirkende Kraft und die daraus folgende Beschleunigung sind einander proportional.

Daraus folgt

Ein Newton ist die Kraft, die einem Körper mit der Masse 1 kg die Beschleunigung  $1 \text{ m/s}^2$  erteilt.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

F Kraft in N  
m: Masse in kg  
a: Beschleunigung in  $\text{m/s}^2$

### Beispiel 1:

Die Gewichtskraft  $F_G$  berechnet sich aus der Masse  $m$  und der Fall- oder Erdbeschleunigung  $g$ :  $F_G = m \cdot g$

Zur Information:

#### 3. Axiom von Newton = Wechselwirkungsgesetz (actio = reactio):

Jede Kraft besitzt eine Gegenkraft (Reaktionskraft) von gleichem Betrag, aber entgegengesetzter Richtung.

Die Angriffspunkte der beiden Kräfte liegen in zwei verschiedenen Körpern.  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$

<sup>1)</sup> Galileo Galilei, 1564-1642, italienischer Naturforscher, Versuche zur Trägheit, Fallbeschleunigung, Schwingungen, schiefe Ebene, fand Jupitermonde und Sonnenflecken.

<sup>2)</sup> Isac NEWTON, 1642-1727, englischer Physiker, Trägheitsgesetz, Grundgleichung, Wechselwirkungsgesetz, zerlegte weißes Licht.





### 5.3.2 Radialkraft

Bei der gleichförmigen Rotation tritt eine Beschleunigung auf, die Radialbeschleunigung.

Nach dem **Grundgesetz** der Mechanik gibt es demnach eine Kraft, die proportional zur Radialbeschleunigung ist und die gleiche Richtung hat. Es ist die **Radial-** oder **Zentripetalkraft**.

$$F_r = m \cdot a_r$$

$$= m \cdot \frac{v^2}{r}$$

$$F_r = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

Abb.6: Radialkraft = Zentripetalkraft



Die **Radialkraft** zwingt einen Körper auf eine Kreisbahn. Sie hindert ihn daran, tangential die Kreisbahn zu verlassen. Die **Radialkraft** ist **radial nach innen** gerichtet.

Da bei der gleichförmigen Rotation die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  konstant ist, ist der **Betrag** der Radialkraft auch konstant.

#### Beispiel 2:

Um Körper auf einer ebenen Fläche zu verschieben, muss die Reibungskraft überwunden werden. Sie beträgt  $F_R = \mu \cdot m \cdot g$ .

Im Falle einer Drehscheibe (Abb.7) wird die Radialkraft durch die Reibung übertragen. Die Körper bleiben bei Drehung auf der Scheibe, wenn die Radialkraft kleiner oder gleich der Reibungskraft ist:

$$F_r \leq F_R \quad \text{bzw.}$$

$$m \cdot \omega^2 \cdot r \leq \mu \cdot m \cdot g$$

$$\omega^2 \cdot r \leq \mu \cdot g$$



Abb.7: Radialkraft durch Reibung

Ist die Reibkraft kleiner, können die Körper nicht gehalten werden und rutschen aufgrund ihrer Trägheit nach außen.

#### Anmerkung:

Wenn ein **ruhender Beobachter** eine Drehbewegung (oder ein rotierendes System) sozusagen von außen betrachtet, muss für ihn eine Kraft in Richtung des Kreisbahnmittelpunktes wirken. Der Beobachter „sieht“ die **Radial-** oder **Zentripetalkraft**.

**Bewegt** sich ein **Beobachter** mit einem rotierenden System, **empfindet** er eine nach außen gerichtete Kraft, die **Zentrifugalkraft**. Die **Zentrifugal-** oder **Flihkraft**  $F_z$  ist eine **Trägheitskraft**, die auftritt, weil der Beobachter sich in einem beschleunigten System befindet.

Die **Zentrifugalkraft** hat den gleichen Betrag wie die **Radialkraft**, aber die entgegengesetzte Richtung. Sie ist **radial nach außen** gerichtet.

#### Beispiel 3:

Fahrradfahrer müssen sich bei Kurvenfahrten in die Kurven neigen (Abb.8).

Wie groß darf die maximale Geschwindigkeit und wie groß muss die Neigung sein?

#### Lösung 3:

Die im Schwerpunkt angreifende Resultierende  $F_N$  aus der Gewichtskraft  $F_G$  und der Zentrifugalkraft  $F_z$  muss durch den Auflagepunkt A des Rades gehen:

$$F_z = \tan \alpha \cdot F_G \quad (1)$$

Bei maximaler Geschwindigkeit ist die Radialkraft  $F_r$  gleich der Reibkraft  $F_R$ :

$$F_r = F_R \quad (2)$$

$$\text{Aus (2): } m \cdot \frac{v^2}{r} = \mu \cdot m \cdot g$$

$$\frac{v^2}{r \cdot g} = \mu \quad (3)$$

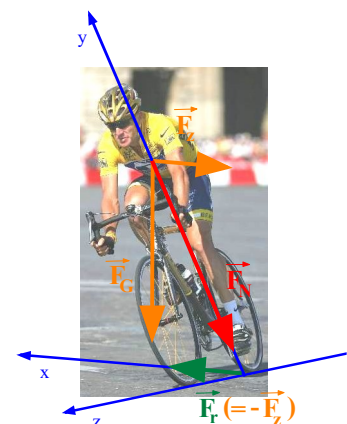


Abb.8: Fahrrad in Schräglage

Daraus berechnet sich die **maximale Geschwindigkeit**:

$$v = \sqrt{\mu \cdot r \cdot g}$$



$$\text{Aus (1): } m \cdot \frac{v^2}{r} = \tan\alpha \cdot m \cdot g$$

$$\tan\alpha = \frac{v^2}{r \cdot g} \quad (4)$$

Aus (3) und (4) erhält man die Neigung:

$$\tan\alpha = \mu$$

## 5.4 Aufgaben zur gleichförmigen Rotation

### Aufgabe 4:

Die Trommel eines Wäschetrockners mit einem Durchmesser von 260 mm dreht mit  $2800 \text{ min}^{-1}$ . In einem Kleidungsstück am Trommelrand sind Wassertropfen der Masse 0,1 g.

- Wie groß ist die Bahngeschwindigkeit der Wassertropfen?
- Welche Radialkraft wirkt auf sie?

### Aufgabe 5:

Ein Auto soll mit 50 km/h durch einen Kreisverkehr (mit Durchmesser 60 m) fahren. Ist dies bei normalen Straßenverhältnissen (Haftreibung 0,65) und bei nasser Fahrbahn (Haftreibung 0,40) aus physikalischer Sicht möglich?

### Aufgabe 6:

Im Mittelalter glaubte man nicht, dass die Erde eine Kugelform habe, unter anderem, weil dann die Menschen davonfliegen würden.

Entkräfte diese Kritik, indem du die wirkenden Kräfte vergleichst.

### Aufgabe 7:

Yuriy Sedykh aus Russland hält seit dem 30.08.1986 den Weltrekord im Hammerwerfen mit 86,74 m. Welche Haltekraft war kurz vor dem Abwurf nötig, wenn der Radius der Kreisbahn des Hammers 1,80 m betrug. Der Hammer wiegt 7,257 kg.

Hinweis: Das Gesetz des schrägen Wurfes ist nachzulesen.

## 5.5 Aus Wissenschaft und Technik

### Zentrifugen:

Mit Zentrifugen werden Gemische aus Stoffen unterschiedlicher Dichte getrennt. Das bekannteste Beispiel ist wohl das Trennen der Milch, um die Sahne zu gewinnen.

Andere Anwendungen sind das Schleudern von Waschtrommeln, von Honigwaben und von Prüflingsgläsern bei den Blutanalysen.

Bei Ultrazentrifugen (Abb.9) treten Drehzahlen von  $20\,000 \text{ s}^{-1}$  auf, wobei die Zentrifugalkräfte millionenfach größer sind als die Schwerkraft.



Abb.9: Ultrazentrifuge

### Achterbahn:

Neben dem Karussell sind auf der „Schueberfouer“ viele weitere Kreisbewegungen vorzufinden. Bei Bewegungen und Beschleunigungen um alle möglichen Achsen treten teils hohe Zentrifugalkräfte (Abb.10) auf, die nicht jeder gut Magen verträgt!

Bei der Loopingbahn der klassischen Achterbahn dürfen die Insassen am höchsten Punkt der vertikalen Kreisbewegung nicht aus dem Wagen fallen. Die wirkenden Zentrifugalkräfte müssen demnach größer als die Gewichtskraft sein. Bei einem Bahndurchmesser von 12 m entspricht dies einer Mindestgeschwindigkeit von ca. 27,6 km/h. Kannst du die Berechnungsformel aufstellen?



Abb.10: Achterbahn

Am tiefsten Punkt werden die Insassen fest in die Sitze gedrückt. Um wie viel ist die Zentrifugalkraft dort größer als die Schwerkraft? (Vergiss die potentielle Energie nicht).

### Raumfahrt:

Die hohen Beschleunigungen, die in Raumschiffen auf Astronauten und Geräte wirken, werden mit großen Zentrifugen simuliert.

Abb.11: Training an der Zentrifuge



## D Schwingungen

### 1 Schwingung als periodischer Vorgang

#### 1.1 Definition

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

Beispiele mechanischer Schwingungssysteme sind das Federpendel (Abb.1) oder das Fadenpendel (Abb.2).

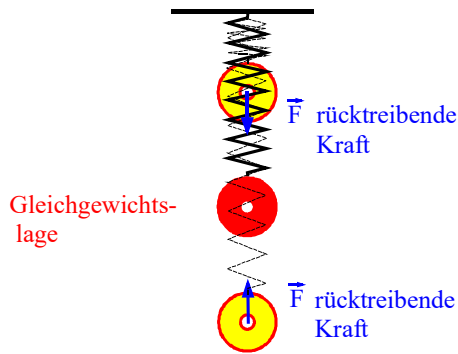


Abb.1: Federpendel

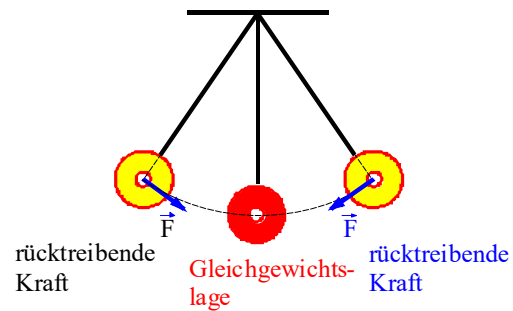


Abb.2: Fadenpendel

Unter der **mechanischen Schwingung** eines Körpers versteht man eine Bewegung, die unter der **Einwirkung einer Rückstellkraft** um die **Gleichgewichtslage** des Körpers verläuft. Die Auslenkungen wiederholen sich **zeitlich periodisch**.

#### 1.2 Kennzeichnende Größen

Nachfolgende Größen dienen zur Beschreibung von Schwingungen:

- Die Schwingungsdauer oder **Periodendauer T** gibt den Zeitraum zwischen zwei gleichen, aufeinander folgenden Schwingungszuständen an. Es ist somit die erforderliche Zeit einer vollständigen Hin- und Herbewegung.  
Einheit der Periodendauer: **Sekunde s**
- Die **Frequenz f** ist der Quotient aus der Anzahl an Schwingungen und der hierzu erforderlichen Zeit.  
Einheit der Frequenz: **Hertz Hz** (= 1/s)
- Die Auslenkung oder **Elongation y** ist die Strecke, um die sich der Körper aus der Gleichgewichtslage entfernt hat.  
Die Elongation ist vorzeichenbehaftet.  
Einheit der Elongation: **Meter m**
- Die **Amplitude y<sub>0</sub>** ist die größte Auslenkung oder maximale Elongation.  
Die Amplitude erhält immer ein positives Vorzeichen.  
Einheit der Amplitude: **Meter m**
- Die rücktreibende Kraft oder **Rückstellkraft F** ist die auf den Körper wirkende Kraft, die auf die Gleichgewichtslage gerichtet ist.  
Je größer die Elongation, desto größer ist die Rückstellkraft.  
Einheit der Rückstellkraft: **Newton N**

## 2 Harmonische Schwingung

### 2.1 Schwingungssysteme

#### 2.1.1. Federpendel

Auf einen Körper, der an einer Feder hängt, wirken die **Gewichtskraft** und die **Federspannkraft**. Die daraus resultierende Kraft ist der Auslenkung der Feder proportional (Gesetz von Hook).

Dementsprechend (3. Axiom von Newton) ist die rücktreibende Kraft der Elongation proportional.

Man kann festhalten:  $F = D \cdot y$

Die Größe D entspricht der Federkonstanten c.

#### 2.1.2. Fadenpendel

Man erhält die Rückstellkraft F, indem man die Gewichtskraft  $F_G$  in zwei Komponenten zerlegt (Abb.3).

Der Betrag der tangentiellen Komponente der Gewichtskraft ist:  $F =$

Der Weg y berechnet sich aus der Pendellänge l und dem Winkelmaß  $\varphi$ :  $y =$

Bei Auslenkungen die klein sind gegenüber der Pendellänge gilt  $\sin\varphi \approx \varphi$

Man erhält somit für die Rückstellkraft:  $F =$

bzw. (mit  $D = m \cdot g / l$ )  $F = D \cdot y$

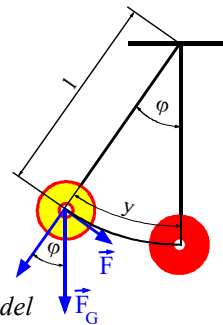


Abb.3: Rückstellkraft am Fadenpendel

#### 2.1.3. Definition

Bei einer **harmonischen Schwingung** ist die rücktreibende Kraft proportional der Auslenkung aus der Gleichgewichtslage.

$F = D \cdot y$  F: Kraft in N  
D: Direktionsgröße in N/mm  
y: Auslenkung in mm

## 2.2 Eigenschaften harmonischer Schwingungen

### 2.2.1 Weg-Zeit-Diagramm

Der Zusammenhang zwischen dem Weg und der Zeit bei Schwingungsvorgängen wird durch einen Versuch ermittelt:

In kleiner Körper A mit Masse m führt hierbei eine gleichförmige Kreisbewegung aus (Abb.4). Seine Bewegung wird durch paralleles Licht auf einen Schirm projiziert. Der Schattenpunkt P beschreibt eine Hin- und Herbewegung zwischen den Punkten P<sub>1</sub> und P<sub>2</sub>.

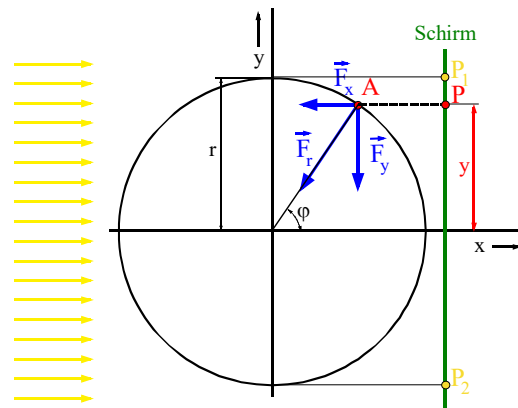


Abb.4: Harmonische Schwingung

Auf den Körper wirkt die Radialkraft  $F_r$ :  $F_r = m \cdot a_r = m \cdot \frac{v^2}{r}$

Die Radialkraft zerlegt man vektoriell in eine Kraftkomponente  $F_y$  parallel zum Schirm und eine Kraftkomponente  $F_x$  senkrecht dazu. Die Bewegung auf dem Schirm wird nur durch die parallele Komponente  $F_y$

hervorgerufen.  $F_y =$  (1)

Für den Winkel  $\varphi$  gilt:  $\sin\varphi =$  (2)

(1) und (2) ergibt:  $F_y =$

Die Größen  $F_r$  und  $r$  sind konstant, man kann die Gleichung daher anschreiben als

$$F_y = D \cdot y \quad (3)$$

Entsprechend der Definition beschreibt dies eine harmonische Schwingung. Man kann daher sagen:

**Wenn ein Körper eine gleichförmige Kreisbewegung beschreibt, führt sein Schatten eine harmonische Schwingung aus.**

Betrachtet man Abb.4, so erkennt man daß die maximale Auslenkung des Schattenpunktes P dem Radius des Kreises entspricht:

$$y = r \quad (4)$$

Aus (1)  $F_y = F_r \cdot \sin\varphi$

mit (3)  $F_y = D \cdot y$

erhält man mit (4):

$$D \cdot y = D \cdot r \cdot \sin\varphi$$

$$y = r \sin\varphi$$

Der Winkel  $\varphi$  zu einem Zeitpunkt  $t$  hängt von der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und dem Winkel  $\varphi_0$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  ab (siehe IC5.1.2):  $\varphi(t) = \omega \cdot t + \varphi_0$  (Man bezeichnet  $\varphi$  als die **Phase** der Schwingung)

Letztendlich gilt:

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

Trägt man die Hin- und Herbewegung des Schattenpunktes P in ein Weg-Zeit-Diagramm ein (Abb.5), erhält man eine Sinuskurve.

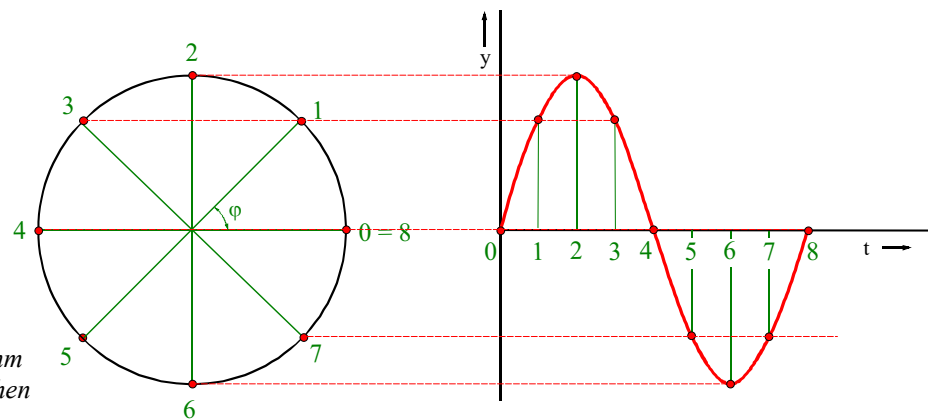


Abb.5: Weg-Zeit-Diagramm einer harmonischen Schwingung

Bei der dargestellten Schwingung ist der Schattenpunkt P zum Zeitpunkt  $t = 0$  in der Mitte des Schirmes. Es gilt  $\varphi_0 = 0$ .

**Weg-Zeit-Gesetz** einer harmonischen Schwingung.

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

$y$ : Elongation (Auslenkung) in m

$y_0$ : Amplitude in m

$\omega$ : Winkelgeschwindigkeit in rad/s

$t$ : Zeit in s

$\varphi_0$ : Phasenwinkel bei  $t = 0$  in rad

Das **Weg-Zeit-Diagramm** einer harmonischen Schwingung ist eine **Sinuskurve**.



### 2.2.2 Phasenwinkel

Zwei harmonische Schwingungen gleicher Periodendauer und gleicher Amplitude können zeitlich verschoben sein. Im Weg-Zeit-Diagramm (Abb.6) erkennt man daß die beiden Schwingungen zu gleichen Zeitpunkten  $t$  unterschiedliche Elongationen  $y$  haben.

Der Schwingungszustand wird durch den **Phasenwinkel  $\varphi$**  beschrieben.

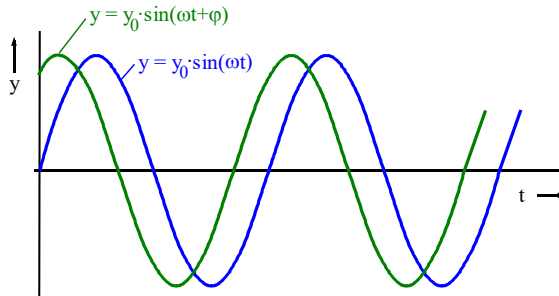


Abb.6: Phasendifferenz gleicher Schwingungen

### 2.2.3 Periodendauer von Schwingungssystemen

Aus dem Weg-Zeit-Diagramm einer harmonischen Schwingung (Abb.7) sind die **Periodendauer  $T$**  und die **Amplitude  $y_0$**  der Schwingung abzulesen.

Desweiteren gibt das Diagramm die **Elongation  $y$**  der Schwingung zu jedem Zeitpunkt  $t$  an.

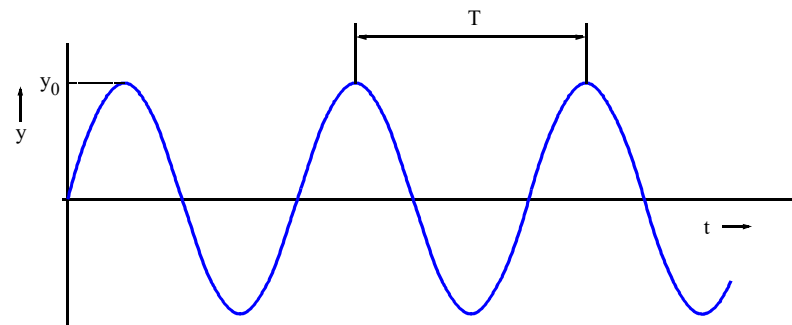


Abb.7: Weg-Zeit-Diagramm einer harmonischen Schwingung

Die Periodendauer der beiden bekannten Schwingungssysteme Federpendel und Fadenpendel berechnet sich wie folgt (siehe TP Schwingungen):

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  $m/s^2$

## 2.3 Aufgaben

### Aufgabe 1:

Die Frequenz eines Schwingungssystems beträgt 0,1 Hz, die Amplitude 2 cm. Stelle die Schwingungen in einem Weg-Zeit-Diagramm dar.

### Aufgabe 2:

Zum Zeitpunkt  $t_0 = 0$  beträgt die Elongation des Schwingungssystems aus Aufgabe 1 -2 cm. Ein gleiches System schwingt mit einem Phasenwinkel von  $\pi/2$  hinterher.

Stelle beide Schwingungen in einem Weg-Zeit-Diagramm dar.

**Aufgabe 3:**

- a) Welche Masse muß an eine vertikal hängende Schraubenfeder ( $D = 20 \text{ N/m}$ ) gehängt werden damit ihre Periodendauer  $\pi \text{ s}$  beträgt?  
 b) Wie groß ist die Verlängerung der Schraubenfeder?

**Aufgabe 4:**

Ein Federschwinger führt pro Minute 30 Schwingungen durch. Wie muß man die Masse verändern, damit er 90 Schwingungen durchführt?

**Aufgabe 5:**

Nach Feierabend wird auf der Baustelle die Tischkreissäge an den Kran gehängt. Sie schwingt mit einer Amplitude von 1,2 m und einer Schwingungsdauer von 4,8 s.

- a) Wie lang ist das Seil?  
 b) Um welche Länge hat sich die Tischkreissäge nach 0,5 s aus der Gleichgewichtslage entfernt?

**Aufgabe 6:**

Eine Pendeluhr (Beispiel Abb.8) geht täglich 3 Minuten vor. Wie genau wird die Uhr wieder richtig gestellt? (Hinweis: die Periodendauer des Pendels sollte 1 s betragen)



Abb.8: Moderne Pendeluhr (Quelle: [www.wanduhrwelt.de](http://www.wanduhrwelt.de))

**Aufgabe 7:**

Ein GALILEI-Hemmungspendel ist ein Fadenpendel, bei dem vertikal unter der Aufhängung A ein Stift S fixiert ist, so daß der Faden dort anschlägt und geknickt wird (Abb.9). Welche Periodendauer erhält man für eine Fadenlänge von 81 cm und einem Abstand von 45 cm zwischen Aufhängung und Stift?

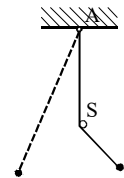


Abb.9: Galilei-Hemmungspendel

## 2.4 Gedämpfte Schwingung

Bei vielen Schwingungen nimmt die Amplitude im Laufe der Zeit ab (Abb.10), nachdem das System durch eine einmalige Anregung in Schwingung versetzt wurde. Hier spricht man von **gedämpften** Schwingungen.

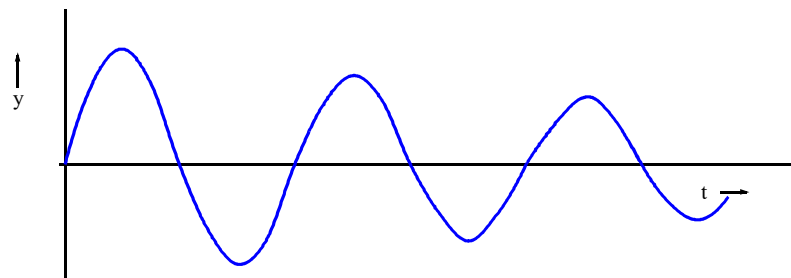


Abb.10: Gedämpfte Schwingung

Der Grund dafür liegt darin, daß ein Teil der mechanischen Energie allmählich in eine andere Energieform umgewandelt wird.

## 2.5 Überlagerung harmonischer Schwingungen gleicher Frequenz

Die resultierende Schwingung aus der Überlagerung von zwei Schwingungen **gleicher Frequenz** erhält man, indem man zu jedem Zeitpunkt die Summe der Elongationen bestimmt.

Nachfolgend werden einige Sonderfälle betrachtet:

### 2.5.1 Phasengleiche Schwingungen

Bei Schwingungen gleicher Periodendauer, deren Phasenverschiebung ein geradzahliges Vielfaches von  $\pi$  ist ( $\Delta\varphi = 2 \cdot k \cdot \pi$ ,  $k \in \mathbb{N}$ ), unterscheiden die Diagramme sich nur in der Elongation. Die resultierende Amplitude ist die Summe der Amplituden der beiden Schwingungen (Beispiel in Abb.11).

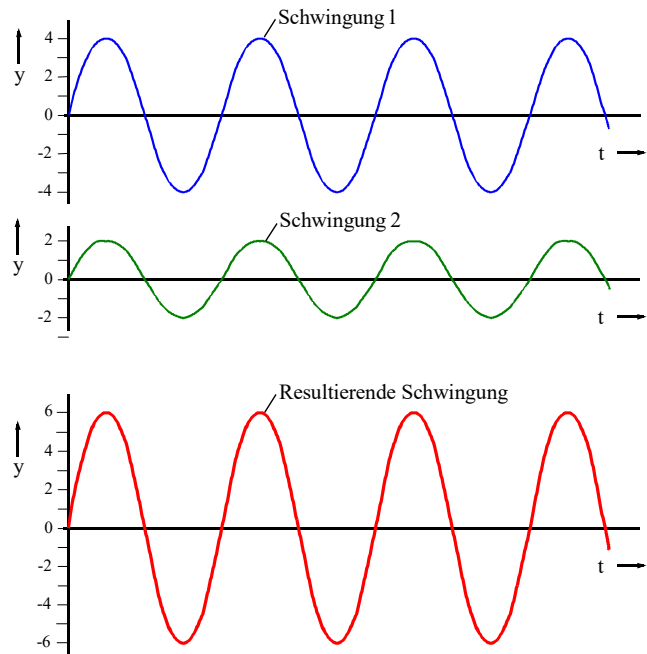


Abb.11: Überlagerung gleichphasiger Schwingungen

Die Überlagerung **gleichphasiger** Schwingungen führt zu einer **maximalen Verstärkung** der resultierenden Schwingung.

### 2.5.2 Phasendifferenz $\pi$

Bei Schwingungen gleicher Periodendauer, deren Phasenverschiebung ein nichtgeradzahliges Vielfaches von  $\pi$  ist ( $\Delta\varphi = (2 \cdot k + 1) \cdot \pi$ ,  $k \in \mathbb{N}$ ), ist die resultierende Amplitude die Differenz der Amplituden der beiden Schwingungen (Beispiel in Abb.12).

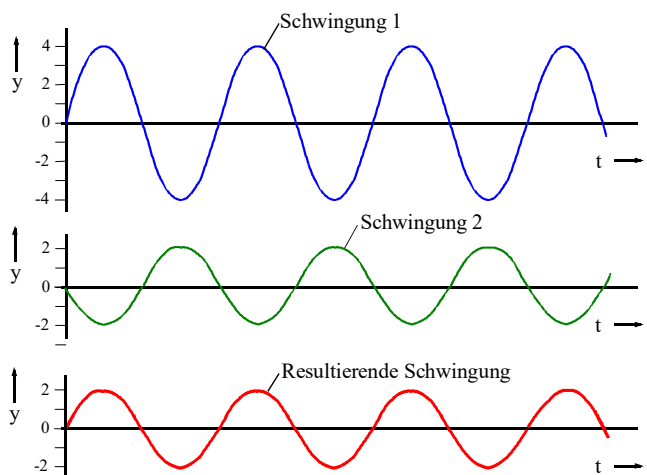


Abb.12: Überlagerung von Schwingungen mit Phasendifferenz  $\pi$

Die Überlagerung phasenverschobener Schwingungen führt bei einer **Phasendifferenz  $\pi$**  zu einer **Abschwächung** der resultierenden Schwingung.

Die Überlagerung phasenverschobener Schwingungen **gleicher Amplitude** führt bei einer **Phasendifferenz  $\pi$**  zu einer **Auslöschung** der resultierenden Schwingung.



### 2.5.3 Beliebige phasenverschobene Schwingungen

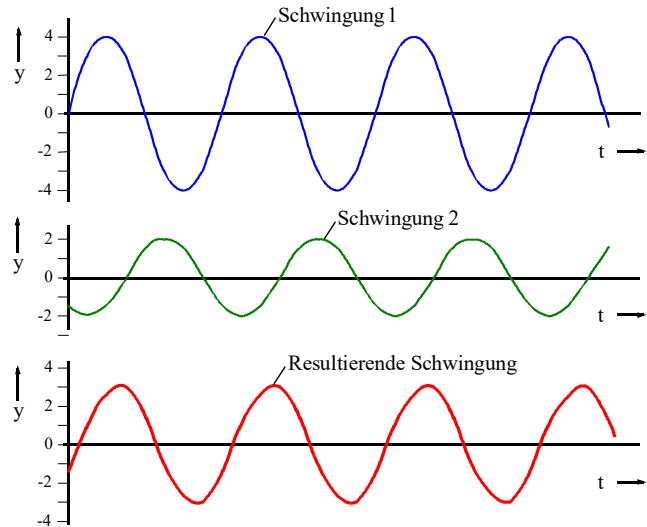


Abb.13: Überlagerung beliebig phasenverschobener Schwingungen

Die Überlagerung **phasenversetzter** Schwingungen (Abb.13) führt wieder zu einer **harmonischen** Schwingung.

### 2.5.4 Zusammenfassung

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

## 2.6 Eigenschwingung, erzwungene Schwingung und Resonanz

### 2.6.1 Eigenschwingung

Wenn man jeweils an gleicher Stelle über die Saite einer Gitarre streift, führt die Saite jeweils die gleichen Schwingungen aus und man hört einen Ton gleicher Frequenz. Ebenso bewegen sich Sträucher bei jedem Windstoß mit gleicher Frequenz, die man als **Eigenfrequenz** des Schwingungssystems bezeichnet.

Die einmalige Anregung eines Schwingungssystems führt zu gedämpften Schwingungen, die man **Eigenschwingungen** des Systems nennt.

### 2.6.2 Erzwungene Schwingung

Wenn ein schwingungsfähiges System durch eine von außen periodisch veränderlicher Kraft angeregt wird, führt es Schwingungen mit der Frequenz des Erregers aus. Diese **erzwungenen Schwingungen** haben demzufolge die **Erregerfrequenz**.

### 2.6.3 Resonanz

Wenn **Eigenfrequenz** des Schwingers und **Erregerfrequenz** übereinstimmen, dann treten die größten Amplituden auf. Erreger und Schwinger befinden sich dann in Resonanz (Abb.14).

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

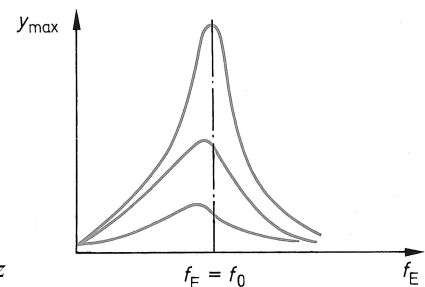


Abb.14: Resonanz

## 2.7 Aufgaben

### Aufgabe 8:

Die Frequenz von zwei Schwingungssystemen beträgt 0,2 Hz, die Amplitude 3 cm. Zum Zeitpunkt  $t_0 = 0$  beträgt die Elongation beider Systeme 0 cm, beide sind am ansteigen.

- Stelle die Schwingungen und die überlagerte Schwingung in einem Weg-Zeit-Diagramm dar.
- Ein drittes System schwingt mit gleicher Frequenz und einer Amplitude von 6 cm um den Phasenwinkel  $\pi$  voraus. Zeichne die dritte Schwingung und die resultierende Schwingung aus den drei Systemen in das gleiche Diagramm.

### Aufgabe 9:

Ein PKW hat eine Eigenfrequenz von 1,2 Hz. Die Fahrbahn wurde aus 15 m langen Betonplatten hergestellt, zwischen denen sich eine schmale Fuge befindet. Bei welcher Geschwindigkeit werden die Stoßdämpfer (oder besser Schwingungsdämpfer) des Autos am meisten beansprucht?

## 3 Aus Wissenschaft und Technik

### Pendeluhr

Der Holländer Christian Huygens baute 1657 die erste Pendeluhr, bei der die gleichmäßigen Schwingungen die Gang der Uhr regeln.

Die Antriebsenergie (Abb.15) wird durch die Gewichtskraft einer Masse geliefert, durch Zahnräder sind Zeiger und Minutenrad miteinander verbunden.

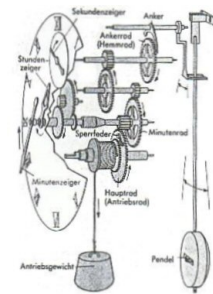


Abb.15: Pendeluhr

### Einsturz einer Brücke

In Tacoma (US-Bundesstaat Washington) wurde am 7. November 1940 eine neu erbaute Brücke (Einweihung am 1. Juli) bei einem Sturm dermaßen in Schwingungen gebracht, dass sie einstürzte (Abb.16). Der Wind stimmte mit der Eigenfrequenz der Brücke überein und die Resonanzschwingungen brachten diese zum Einsturz.



Abb.16: Tacoma Narrows Bridge

### Rollen bei Schiffen

Die Wellenbewegungen des Wassers führen zu Schwingungen der Schiffe um die Längsachse, die man als Rollen oder Schlingern bezeichnet. Dieses kann zu starkem seitlichem Neigen führen.

In gleichartigen Schlingertanks an Back- und Steuerbord des Schiffes, die mit dicken Rohren verbunden sind (Abb.17), befindet sich Wasser, das um  $180^\circ$  phasenverschoben schwingt. Dadurch kann die Amplitude des Rollens auf ein Drittel verringert werden.

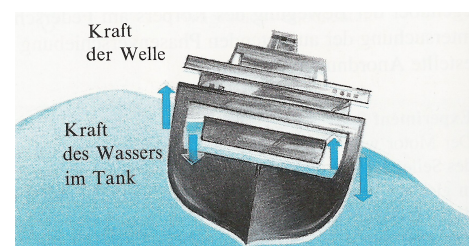


Abb.17: Schlingertank

### Resonanz am PKW

Die Vibrationen des Motors und das Abrollen auf der Fahrbahn erregen alle Bauteile des PKW's zu erzwungenen Schwingungen. Bei bestimmten Drehzahlen oder Geschwindigkeiten können diese mit den Eigenfrequenzen einzelner Bauteile übereinstimmen. Dann „klirren“ beispielsweise Teile des Armaturenbrettes, das Lenkrad oder der Schalthebel.

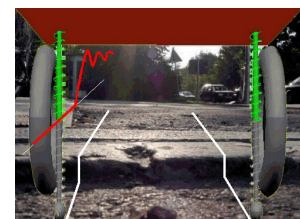


Abb.18: Berechnungen mit mathematischem Modell

## II Werkstofftechnik

### A Innerer Aufbau der Metalle

In natürlicher Größe erscheinen die Metalle als einheitlicher Stoff ohne Untergliederung. Betrachtet man die angeätzte Oberfläche eines Metalls rund 10000fach vergrößert, z. B. mit einem Elektronenmikroskop, so sieht man, dass die Metalle einen äußerst komplizierten Feinbau besitzen (Abb.1, rechts oben). Man erkennt, dass sie sich aus einer Vielzahl kleiner, regelmäßig geformter **Körner**, auch **Kristalle** genannt, zusammensetzen.

Den Feinbau der Metalle bezeichnet man als kristallinen Aufbau oder als kristalline Struktur.

Vergrößert man die Ecke eines Kristalls noch stärker, z. B. 10'000'000fach, so gelangt man zu den kleinsten Teilchen der Metalle, den Atomen (Abb.1, unten). Sie sind in genauen Abständen und Winkeln angeordnet.

Verbindet man die Mittelpunkte der Metallatome, so ergeben die Verbindungslinien ein räumliches Gitter, das als Raumgitter oder **Kristallgitter** bezeichnet wird. Die kleinste typische Einheit dieses Kristallgitters nennt man **Elementarzelle**.

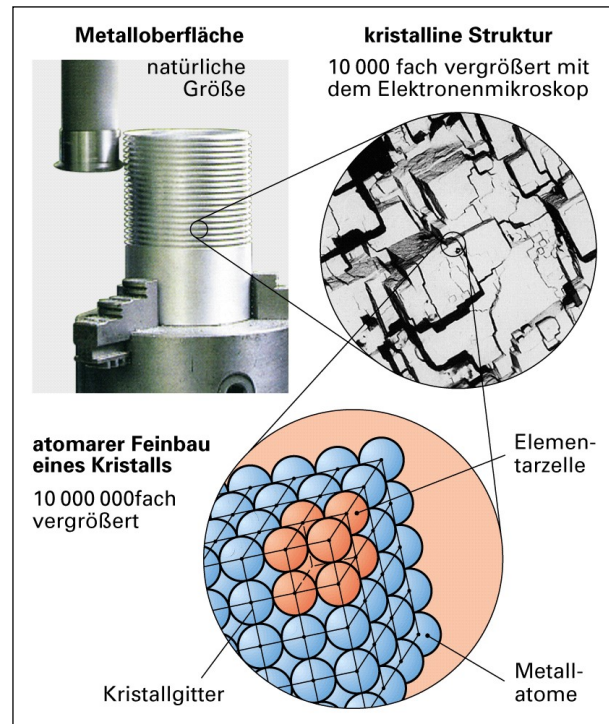


Abb.1: Metalloberfläche und innerer Aufbau

Hinweis zum Kapitel „Werkstofftechnik“:

Auszüge aus Werkstofftechnik für Metallberufe  
Europa-Lehrmittel  
ISBN 3-8085-1543-0

Fachkunde Metall  
Europa-Lehrmittel  
ISBN 38085-1153-2Technologie Metall

Grundlagen 1./2. Ausbildungsjahr  
Cornelsen Girardet  
ISBN 3-590-81990-1

Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung  
Wilhelm Domke  
Verlag Girardet  
ISBN 3-7736-1219-2

# 1 Innerer Aufbau, Eigenschaften

## 1.1 Metallbindung und Festigkeit

Im festen Aggregatzustand besitzen die Metalle einen festen Zusammenhalt. Ursache hierfür ist die Metallbindung, die die einzelnen Metallteilchen zusammenhält. Die Metallbindung entsteht bei der Gewinnung des Metalls durch Zusammenlagern der Metallatome direkt nach der Reduktion des Erzes. Dabei werden locker gebundene Elektronen der Metallatome abgegeben (Abb.2). Sie umgeben den Metallatom-Verband als Elektronenwolke. Die Elektronen können sich in der Elektronenwolke frei bewegen, sie aber nicht verlassen. Sie halten die Metallatome wie eine Art "Elektronenkitt" zusammen.

Die Metallbindung bewirkt den äußerst festen Zusammenhalt der Metallteilchen und damit die Festigkeit der Metalle.

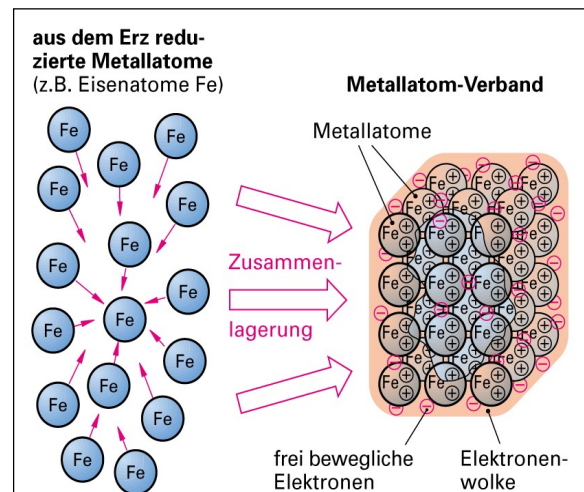


Abb.2: Entstehung der Metallbindung (Bsp. Eisen)

## 1.2 Elektrische Leitfähigkeit

Die frei beweglichen Elektronen können durch eine angelegte elektrische Spannung in Bewegung gesetzt werden. Es fließt dann ein Strom von Elektronen (elektrischer Strom).

Metalle sind gute elektrische Leiter.

## 1.3 Verformungsverhalten der Metalle

Metalle verformen sich bei geringer Belastung elastisch und bei hoher Belastung zusätzlich plastisch. Dieses Verformungsverhalten beruht auf ihrem kristallinen Feinbau (Abb.3).

Ist die Krafteinwirkung gering, so werden die Metallatome nur geringfügig von ihrem Gitterplatz verdrängt und federn bei Wegnahme der Kraft wieder in ihre Ausgangslage zurück. Sie verformen sich elastisch.

Bei großer Krafteinwirkung kann an einer Stelle des Kristalls die obere Atomlage von der stabilen „Übereinander-Anordnung“ in die ebenfalls stabile „Auf-Lücke-Anordnung“ verschoben werden.

Diese neue stabile Lage bleibt auch erhalten, wenn die Kraft weggenommen wird. Der Körper hat sich bleibend verformt (plastische Verformung). Nach der Verschiebung wirken wieder ähnlich große Bindungskräfte zwischen den Metallatomen wie vorher. Deshalb erfolgt durch die Verschiebung kein Auseinanderbrechen des Körpers, sondern lediglich eine bleibende Verformung. Die Verformung kann bei fortdauernder Krafteinwirkung so lange fortschreiten, bis alle Metallatomlagen im belasteten Bereich des Bauteils verschoben sind. Erst dann führt weitere Belastung zum Bruch des Körpers.

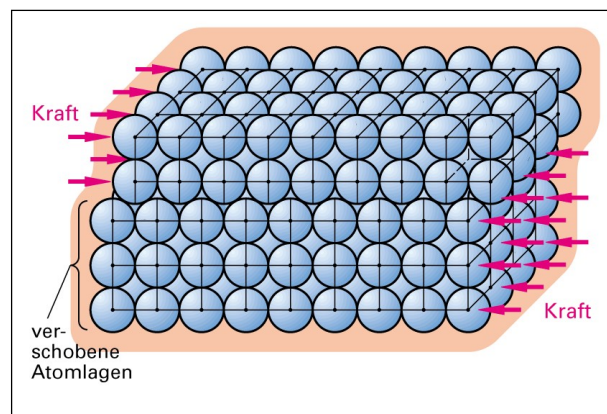


Abb.3: Plastische Verformung eines Kristalls durch Verschieben einer Metallatomlage

## 2 Kristallgittertypen (Elementarzellen) der Metalle

Atome der verschiedenen Metalle können sich in unterschiedlichen geometrischen Anordnungen zusammenfügen. Diese sind von der Metallart und teilweise von der Temperatur abhängig.

Die Metalle haben kubisch-raumzentrierte, kubisch-flächenzentrierte oder hexagonale Kristallgitter.

Die grafische Darstellung der Anordnung der Metallatome erfolgt an Hand einer Elementarzelle (Abb.4).

### 2.1 Kubisch-raumzentriertes Kristallgitter

Beim kubisch-raumzentrierten Kristallgitter (krz) ordnen sich die Metallatome so, dass die Verbindungslinien von Atommittelpunkt zu Atommittelpunkt einen Würfel (Kubus) bilden (Abb.4, oben). Zusätzlich befindet sich noch ein Metallatom in der Würfelmitte. Ein kubisch-raumzentriertes Kristallgitter hat z. B. Eisen bei Temperaturen unter 911°C sowie Chrom, Wolfram und Vanadium.

### 2.2 Kubisch-flächenzentriertes Kristallgitter

Das kubisch-flächenzentrierte Kristallgitter (kfz) hat ebenfalls einen Würfel als Grundkörper und zusätzlich je ein Atom in der Mitte der Seitenflächen (Abb.4, Mitte). Diese Kristallform haben Aluminium, Kupfer und Nickel sowie Eisen über 911 °C.

### 2.3 Hexagonales Kristallgitter

Ein hexagonales Kristallgitter (hex) besitzen die Metalle Magnesium, Zink und Titan. Bei diesem Gittertyp bilden die Metallatome ein sechseckiges Prisma mit je einem Atom in der Mitte der Grundflächen sowie drei Atomen innerhalb des Prismas (Abb.4, unten).

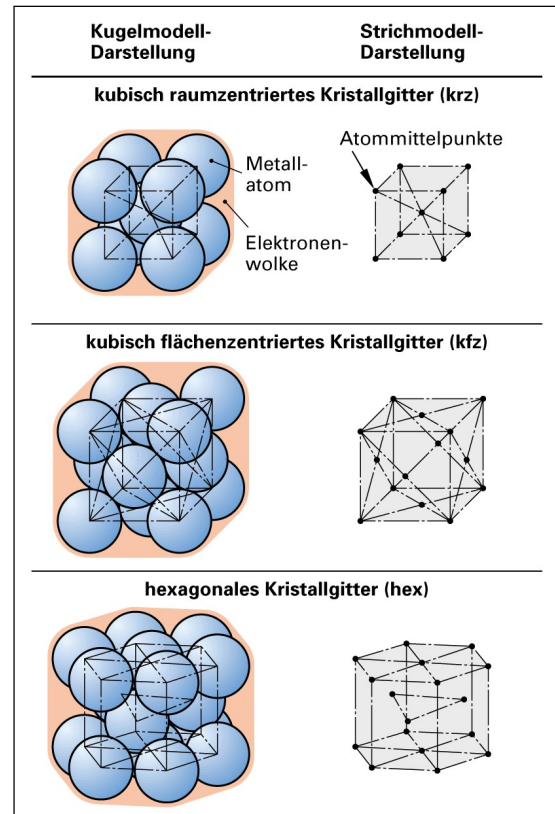


Abb.4: Kristallgittertypen

## 3 Baufehler im Kristall

Die Kristalle eines Metalls sind nicht fehlerfrei, sondern von Fehlern wie Lücken, Versetzungen und Fremdatomen durchsetzt (Abb.5).

Eine **Lücke** ist ein nicht besetzter Gitterplatz im Kristallgitter. Bei einer **Versetzung** ist eine ganze Lage von Metallatomen eingeschoben oder sie fehlt. **Fremdatome** sind Atome eines anderen Elementes, die in das Kristallgitter des Grundmetalls eingebaut sind.

Baufehler bewirken Verzerrungen im Kristallgitter und führen zur Erhöhung der Festigkeit.

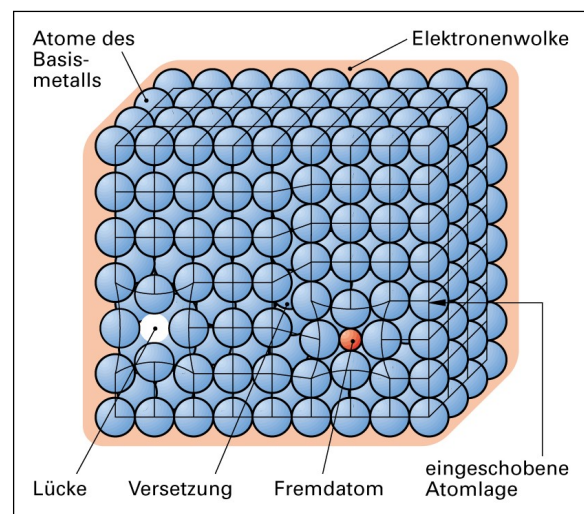


Abb.5: Baufehler im Kristallgitter

Die festigkeitssteigernde Wirkung tritt z. B. beim Legieren auf. Hierbei werden Fremdatome in das Kristallgitter des Grundmetalls eingelagert.

Bei der Verfestigung durch Kaltverformung z. B. entstehen festigkeitssteigernde Lücken und Versetzungen.

## 4 Entstehung des Metallgefüges

Das Gefüge eines metallischen Werkstoffs, d.h. seine Gliederung in Kristalle, entsteht nach dem Vergießen beim Erstarren der Metallschmelze zum festen Metallkörper.

Die Erstarrung einer Metallschmelze verläuft über Zwischenstufen. Beispiel: Die Abkühlung von reinem Eisen und die dabei ablaufenden Vorgänge in der Schmelze (Abb.6)

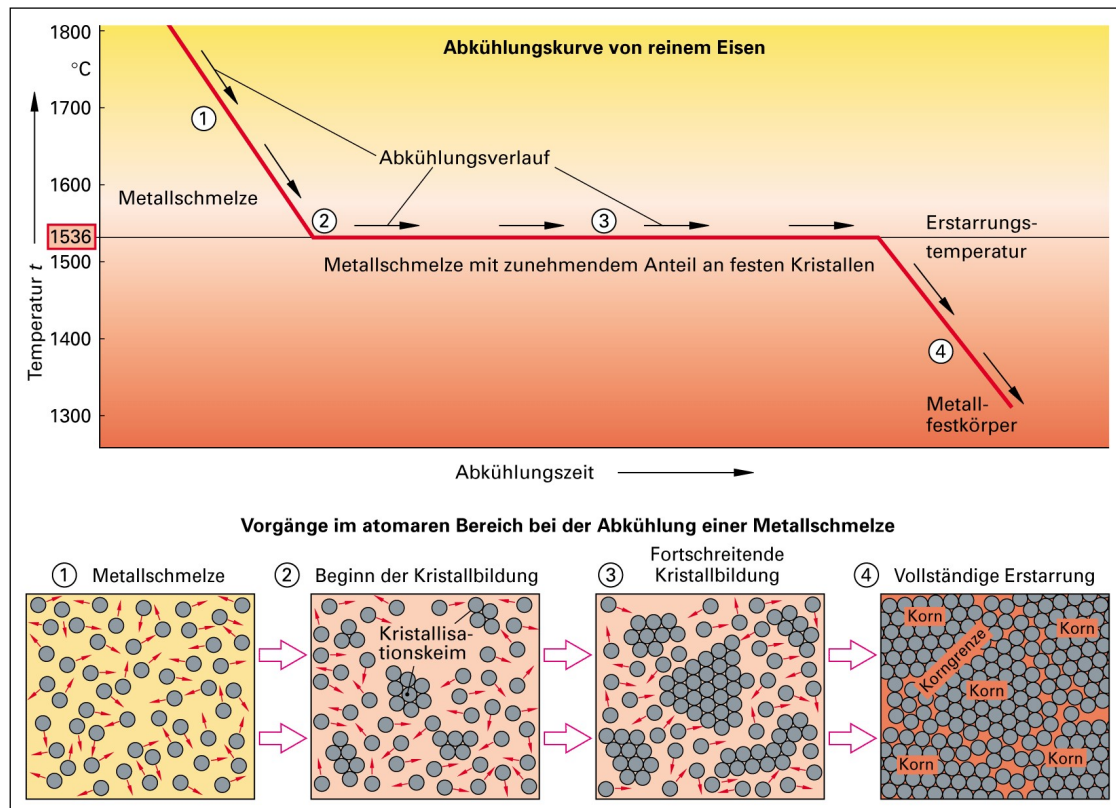


Abb.6: Abkühlungskurve und kristalline Vorgänge in einer Metallschmelze

① **Metallschmelze.** In der Metallschmelze bewegen sich die Metallatome frei und regellos durcheinander. Bei der Abkühlung der Schmelze wird die Bewegung der Metallatome langsamer.

② **Beginn der Kristallbildung.** Bei Erreichen der Erstarrungstemperatur (bei Eisen: 1536°C) in der Schmelze beginnt die Zusammenlagerung der Metallatome nach einem Kristallgittertyp. Die Stellen, an denen das Kristallwachstum beginnt, nennt man Kristallisationskeime.

③ **Fortschreitende Kristallbildung.** Von den Kristallisationskeimen ausgehend gliedern sich immer mehr Metallatome aus der Restschmelze den Kristallen an. Die Temperatur bleibt während des gesamten Auskristallisierens unverändert auf der Erstarrungstemperatur, da die entzogene Wärme zur Kristallbildung verbraucht wird. Die Abkühlungskurve verläuft waagrecht.

Wenn die Schmelze fast aufgebraucht ist, stoßen die wachsenden Kristalle an ihren Grenzen aneinander. Die dadurch unregelmäßig begrenzten Kristalle nennt man **Kristallite** oder **Körner**. Die Metallatome im Grenzbereich zwischen den Körnern können teilweise nicht in das Kristallgitter eingeordnet werden. Sie bilden zusammen mit Fremdatomen zwischen den einzelnen Körnern eine ungeordnete Begrenzungsschicht, die Korngrenze.

④ **Vollständige Erstarrung.** Haben alle Metallatome ihren festen Platz, so ist die Schmelze vollständig erstarrt. Das Gefüge des Werkstoffs hat sich gebildet. Die Temperatur des entstandenen, festen Metallkörpers nimmt durch den Wärmeentzug nun wieder stetig ab, die Abkühlungskurve fällt.

## 5 Gefügearten und Werkstoffeigenschaften

Als **Gefüge** bezeichnet man den Aufbau der Metalle aus den Körnern. Es ist gekennzeichnet durch die Korngröße und die Kornform.

Sichtbar gemacht wird das Gefüge durch ein **metallografisches Schliffbild** (Abb.7).

Ohne Vergrößerung sichtbar ist es bei einer Zinkschicht.

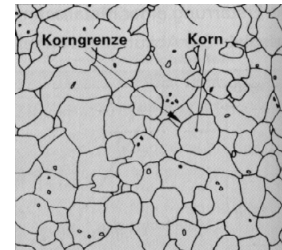


Abb.7: Metallgefüge im Schliffbild

Üblich sind **Korngrößen** von wenigen Mikrometern ( $\mu\text{m}$ ) (feinkörnig) bis in den Millimeter-Bereich (grobkörnig). Feinkörniges Gefüge bedeutet verbesserte mechanische Eigenschaften gegenüber Grobkorn. Durch gezielte Wärmebehandlungs- oder Umformvorgänge kann die Korngröße eines Werkstoffs eingestellt werden.

Häufige **Kornformen** sind rundliche Formen (globular, Abb.8), Vieleckformen (polyedrisch, Abb.9) sowie nadel- (dendritisch, Abb.10) bzw. lamellenartig geformte Kristallite (lamellar, Abb.11). Die einzelnen Metalle bzw. Gefügebestandteile bilden jeweils bestimmte Kornformen.

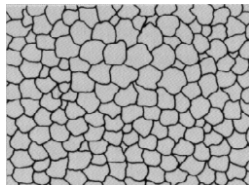


Abb.8: globulare Körner (z.B. reines Eisen)

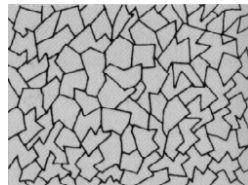


Abb.9: polyedrische Körner (z.B. Austenit)

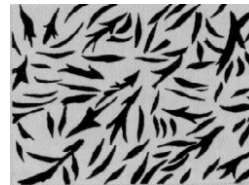


Abb.10: dendritische Körner (z.B. Martensit)

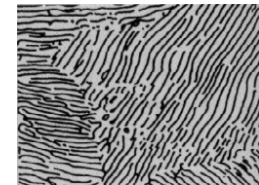


Abb.11: lamellares Gefüge (z.B. Perlit)

Eine Veränderung erfährt die Kornform z.B. durch das Walzen (Textur). Hierbei werden die Körner in Walzrichtung gereckt und damit die Festigkeit in dieser Richtung gesteigert.

### 5.1 Gefüge reiner Metalle

Sie haben ein einheitliches (homogenes) Gefüge (Abb.12).

Alle Körner haben dieselbe Struktur mit einem Kristallgittertyp. Die Körner unterscheiden sich in der Ausrichtung des Gitters. Die Vielzahl der Körner in einem Bauteil gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung in alle Raumrichtungen.

Unbehandelte technische Werkstoffe haben deshalb in allen Richtungen gleiche Eigenschaften, sie sind **isotrop**.

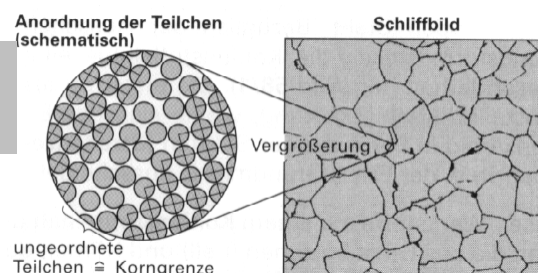


Abb.12: Gefüge von reinem Eisen

Durch den einheitlichen Aufbau, das Fehlen von Fremdatomen und wenig Gitterbaufehlern haben reine Metalle eine **relativ geringe Festigkeit**.

## 5.2 Gefüge von Legierungen

Die meisten Metalle werden in der Technik nicht rein verwendet, sondern zu Legierungen verarbeitet.

**Legierungen** sind Gemische aus mehreren Metallen bzw. Gemische aus Metallen und Nichtmetallen.

Zum Legieren werden die Legierungselemente dem flüssigen Grundmetall zugegeben und lösen sich darin auf. Beim Erstarren der Schmelze können sich, je nach Grundmetall und Legierungselementen, unterschiedliche Gefügearten ausbilden.

Bei **Mischkristall-Legierungen** bleiben die Teilchen des Legierungselementes beim Erstarren der Schmelze gleichmäßig im Kristallgitter des Grundmetalls verteilt (Abb.13)

Mischkristall-Legierungen haben ein ähnliches Schlibfbild wie reine Metalle.

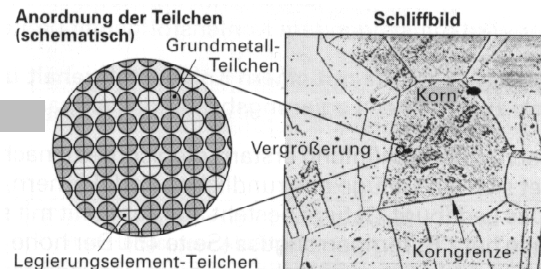


Abb.13: Innerer Aufbau einer Mischkristall-Legierung

Die Mischkristall-Legierungen sind **fester** als die reinen Grundmetalle, dabei aber **gut umformbar**. Die Steigerung der Festigkeit beruht auf den **Gitterverzerrungen** durch die Legierungselement-Teilchen. Mischkristalle bildet z.B. Eisen mit Nickel.

Bei **Kristallgemisch-Legierungen** lagern sich beim Erstarren die Teilchen des Legierungselementes sowie die des Grundmetalls getrennt zu eigenen Kristallen zusammen (Abb.14). Ihr Gefüge besteht aus einem Gemisch verschiedenartiger Körner.

Kristallgemisch-Legierungen haben, gegenüber dem Grundmetall, eine **höhere Festigkeit**. Sie lassen sich aber **schwerer umformen**.

Kristallgemisch-Legierungen bildet z.B. Blei mit Antimon (Hartblei) sowie Eisen mit Kohlenstoff bei hohen Kohlenstoff -Gehalten (Gusseisen).

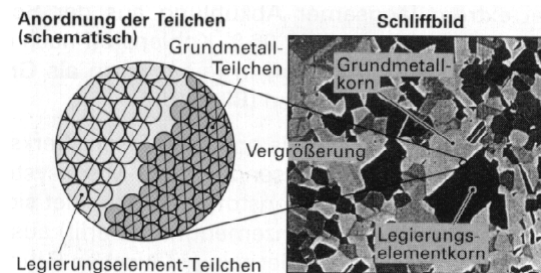


Abb.14: Innerer Aufbau einer Kristallgemisch-Legierung

## 6 Aufgaben

1. Welchen Feinbau haben die Metalle im mikroskopischen bzw. atomaren Bereich?
2. Wie entsteht das Metallgefüge?
3. Welche Kristallgittertypen gibt es?
4. Welche Legierungs-Kristallarten gibt es?
5. Welche Kristallbaufehler gibt es?
6. Worauf beruht die elastische und die plastische Verformbarkeit der Metalle?
7. Wodurch unterscheiden sich reine Metalle und Legierungen bezüglich Gefüge und Eigenschaften?



## B Gefügearten der Eisen-Werkstoffe

### 1 Eisen und Eisenverbindungen

**Reines Eisen** spielt in der Technik keine Rolle. Es ist weich, leicht umformbar und magnetisierbar. Reines Eisengefüge wird **Ferrit** oder  **$\alpha$ -Eisen** genannt.

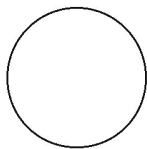
Eisenwerkstoffe enthalten aus dem Herstellungsprozess immer einen bestimmten Kohlenstoffgehalt. Obwohl man den Kohlenstoff nicht als Legierungselement bezeichnet, sind Eisen-Werkstoffe eigentlich kohlenstoffhaltige Eisen-Legierungen. Eisen mit bis zu 2,06% Kohlenstoff nennt man in der Werkstofftechnik **Stahl**, man spricht von **unlegierten Stählen** oder **Kohlenstoffstählen**.

Eisen mit mehr als 2,06% Kohlenstoff wird **Gusseisen** genannt.

In den Kohlenstoffstählen liegt der Kohlenstoff nicht elementar als Kohlenstoff vor, sondern chemisch gebunden als **Eisenkarbid  $Fe_3C$** . Dieser Gefügebestandteil wird **Zementit** genannt. Er ist hart und spröde und überträgt diese Eigenschaften, je nach Anteil, auf den Stahl.

Bezüglich der Ausscheidungsform stellen die Kohlenstoffstähle eine Besonderheit dar. Sie erstarren als **Kristallgemisch-Legierung**, wobei sich das Eisenkarbid in Form dünner Streifen (**Streifen-zementit**) (Abb.11) in der Eisen-Grundmasse ausscheidet.

### 2 Gefügearten in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt



0% Kohlenstoff entspricht reinem Eisen. Das Schlibfbild (Abb.10) von **Ferrit** oder  **$\alpha$ -Eisen** zeigt die Eisenkörner mit den Korngrenzen.

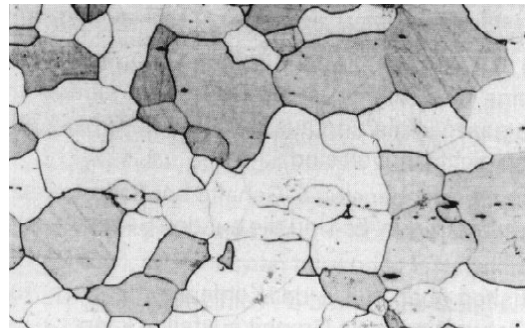
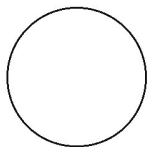


Abb.10: Eisen mit 0% C. M500:1



Eisen-Werkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt **unter 0,8% (untereutktoide Stähle)** haben sowohl Körner, die aus **Ferrit** bestehen (hell) und Körner, deren Ferrit-Grundmasse mit **Streifen-zementit** durchzogen ist (Abb. 11). Diese Gefügekörner aus Ferrit-Grundmasse und Streifen-zementit bezeichnet man als **Perlit-Körner**. Beim Vergütungsstahl 1C45 mit 0,45% Kohlenstoff besteht z.B. das Gefüge etwa jeweils zur Hälfte aus Perlitkörnern und aus Ferritkörnern (Abb.11).

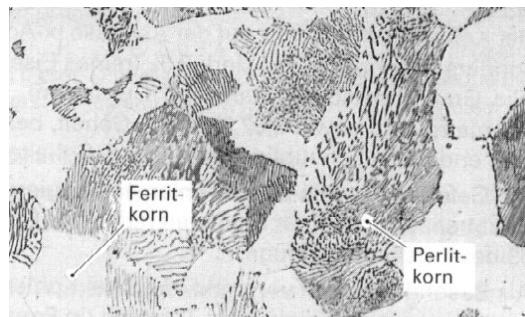
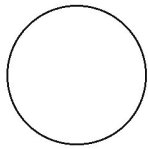


Abb.11: Untereutktoider Stahl 1C45 (0,45% C) M500:1



Stahl mit **0,8 %** Kohlenstoff (**eutektoider Stahl**) besteht aus **rein perlitischem** Gefüge) (Abb.12)

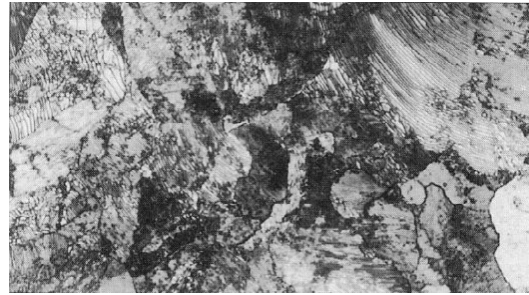
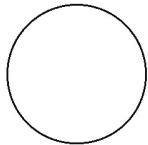


Abb.12: Eutektoider Stahl C 80W1 (0,83% C - Perlit). M500:1



Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt von **0,8 bis 2,06 %** (**übereutektoide Stähle**) enthalten einen weiteren Gefügebestandteil: **den Korngrenzenzementit**. Er entsteht aus dem über 0,8 % liegenden Kohlenstoffanteil. Da alle Körner bei einem C-Gehalt von 0,8 % aus Perlit bestehen, scheidet sich der überschüssige Zementit an den Korngrenzen als Kornumrandung aus (Abb.13), wovon sich seine Bezeichnung Korngrenzenzementit ableitet. Diese **Korngrenzenzementit-Umrandung** (hell) der **Perlitkörner** wird mit steigendem Kohlenstoffgehalt breiter.

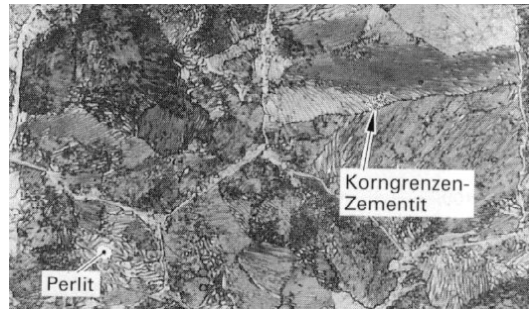
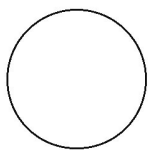


Abb.13: Übereutektoider Stahl C 120 W1 (1,2% C). M500:1

Eisen-Werkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt **über 2,06 %** können je nach Abkühlungsbedingungen und zusätzlichen Legierungsbestandteilen ganz unterschiedliche Gefügearten bilden:



Bei **extrem langsamer Abkühlung** aus der Schmelze und/oder Siliciumgehalt erstarrt die Eisenschmelze mit mehr als 2,06 % Kohlenstoff nach dem „stabilen“ **Eisen-Graphit-System**. Das bedeutet, daß sich der Kohlenstoff in reiner Form als Graphit ausscheidet. Er durchzieht die Gefüge-Grundmasse **als grobe Lamellen** (Abb.14).

Die Gefüge-Grundmasse besteht aus Perlit du Ferrit-Körnern.

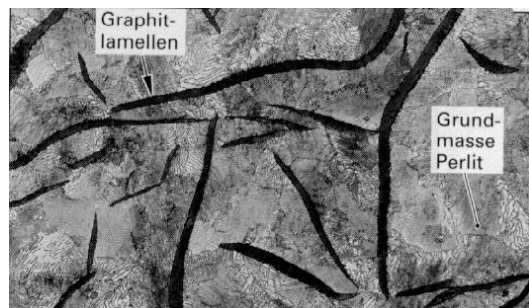
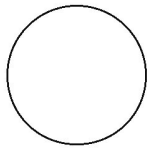


Abb.14: Graphit-Lamellen im Grauguss GG-20 (3,5% C) mit Si-Gehalt nach langsamer Abkühlung. M500:1



Bei **zügiger Abkühlung** erstarrt die Schmelze nach dem „metastabilen“ **Eisen-Zementit-System**. Es bildet sich ein Gefüge aus **rundlichen Perlitkörnern**, die von **Ledeburit-Gefüge** umgeben sind (Abb.15 und 16)

Das **Ledeburit-Gefüge** besteht aus **Zementit** mit sehr fein verteilten **Austenitkristallen**. (=  **$\gamma$ -Mischkristalle**, Eisen – Kohlenstoff in kubisch-flächenzentriertem Gitter.) Ein solches Gefüge hat z.B. Temperrohrguss.

Der hohe Zementitanteil macht solche Eisen-Werkstoffe so hart und spröde, dass sie technisch nicht verwendbar sind.



Abb.15: Temperrohrguss (2,8% C) nach rascher Abkühlung. M500:1

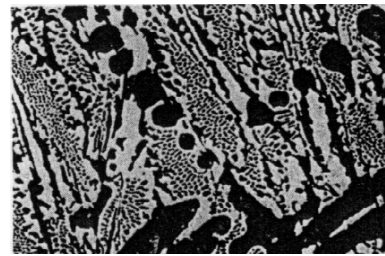
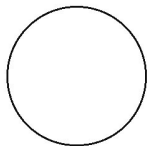


Abb.16: Weißes Gußeisen. Perlit (dunkle Flächen) in Ledeburit. M100:1



Hat die Eisenschmelze **4,3% C**, so erstarrt sie zu einem Gefüge, das vollständig aus **Ledeburit** besteht. Ledeburit (Abb.17) ist ein feines Gemenge aus **Austenit** und **Zementit**. Dieses entsteht beim Abkühlen der Schmelze ohne Erstarrungsbereich, d.h. ähnlich wie bei einem reinen Metall gibt es hier eine Schmelztemperatur.

Eine Legierung mit solch einem Schmelzpunktminimum bezeichnet man als **Eutektikum** (eutektische Gefüge).

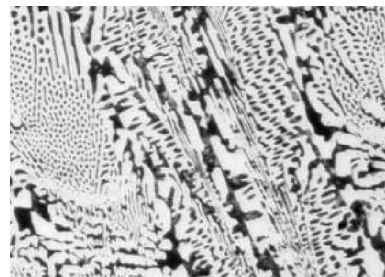


Abb.17: Weißes Gußeisen. M500:1

In der technischen Praxis erstarren Eisen-Werkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt über 2,06 % nach einem **Eisen/Graphit - Eisen/Zementit-Mischsystem**, da sie einen erheblichen Siliciumgehalt besitzen.

Der überwiegende Kohlenstoffanteil scheidet sich als Graphitlamellen aus, während ein kleiner Kohlenstoffanteil als Streifen zementit (im Perlit) ausfällt. Das Gefüge derartiger Eisen-Werkstoffe besteht aus einer Ferrit-Perlit- oder rein perlitischen Grundmasse, in die Graphitlamellen eingelagert sind (Abb.14). Das Schliffbild zeigt das typische Gefüge von Gusseisen mit Lamellengraphit.

### 3 Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild

In Zustandsschaubildern (auch Zustandsdiagramme genannt) sind die Aggregatzustände und die Gefügearten aller Zusammensetzungen einer Zweistofflegierung in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen.

Die technisch wichtigste Zweistofflegierung - das Legierungssystem Eisen-Kohlenstoff (Eisen-Werkstoffe) - hat ein kompliziert aussehendes Zustandsschaubild (Abb.18). Es besteht aus Gefügefeldern, die die vom Kohlenstoffgehalt und der Temperatur aufgespannte Schaubildebene füllen.

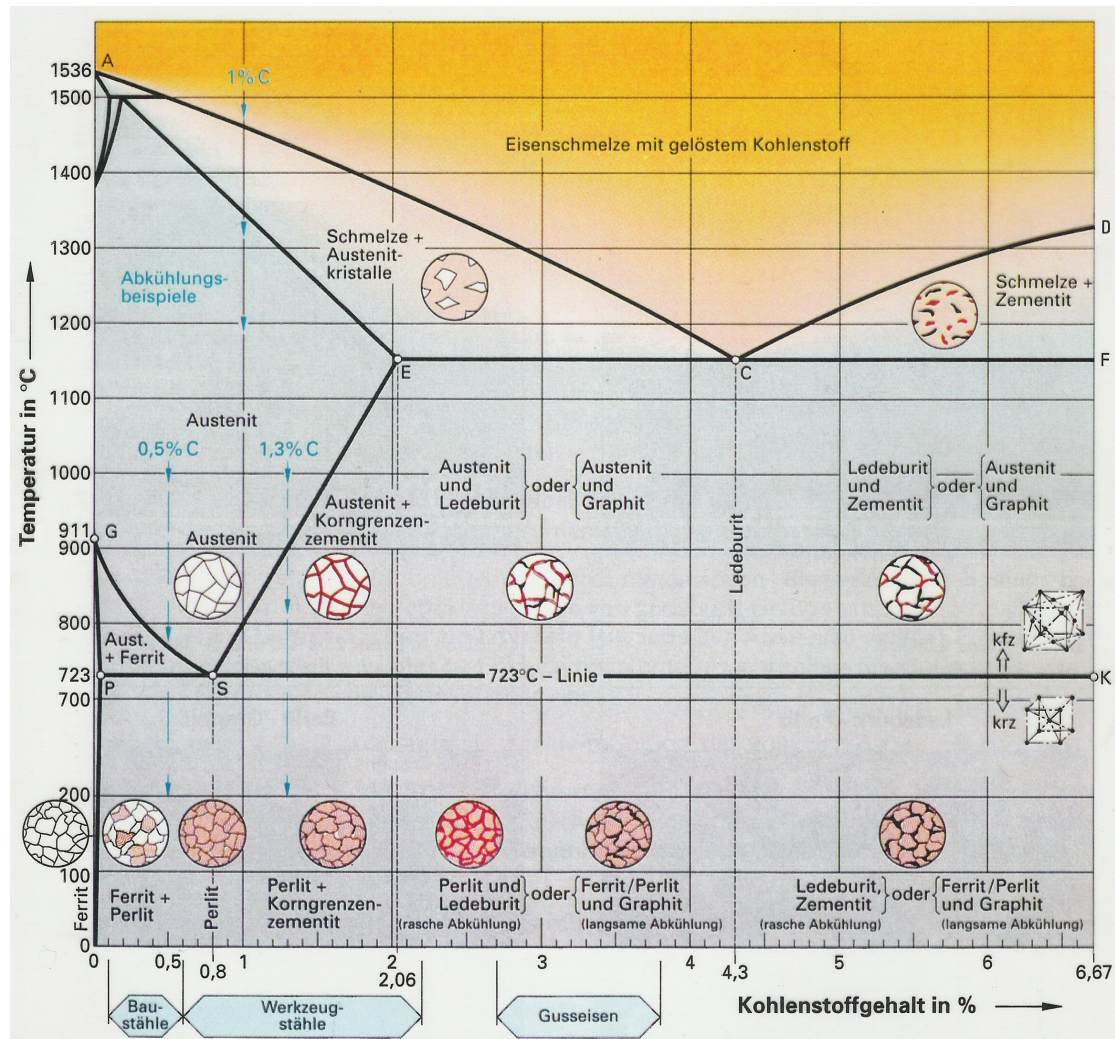


Abb.18: Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild und Gefügebereiche kohlenstoffhaltigen Eisens

#### 3.1 Die Achsen im Diagramm

##### Die Abszisse

Der **Kohlenstoffgehalt** ist auf der Abszisse (x-Achse) aufgetragen: Als markante Kohlenstoffgehalte besonders gekennzeichnet sind:

- 0 % (reines Eisen, Ferrit),
- 0,83 % (mit rein perlitischem Gefüge)
- 2,06% (die Grenze zwischen Stahl und Gusseisen)
- 4,3 % (eine Eisenschmelze mit besonders niedrigem Schmelzpunkt) sowie
- 6,67 % (ein C-Gehalt, bei dem die ganze Legierung aus Zementit  $\text{Fe}_3\text{C}$  besteht).

Hier endet das Schaubild, da höhere C-Gehalte technisch nicht sinnvoll sind.

Die Gefügearten, die Eisen-Kohlenstoff-Legierungen der verschiedensten C-Gehalte bei Raumtemperatur haben, sind in der untersten Reihe des Schaubilds aufgetragen. Es sind die im Abschnitt 2.2 beschriebenen Gefüge.

Als Besonderheit sei vermerkt, dass bei Kohlenstoffgehalten über 2,06 % der Kohlenstoff je nach Abkühlungsgeschwindigkeit als Zementit (in Form von Ledeburit) oder als Graphit ausfallen kann.

### Die Ordinate

Auf der Ordinate (y-Achse) des Zustandsschaubildes ist die **Temperatur** aufgetragen.

Markante Temperaturen sind: die Raumtemperatur (am unteren Rand), die 723°C-Linie (hier findet die Gitterumwandlung vom kubisch-raumzentrierten zum kubisch-flächenzentrierten Kristallgitter statt) und 1536°C (die Schmelztemperatur von reinem Eisen).

## 3.2 Die Flächen im Diagramm

Jeder von **Linien begrenzte Bereich** im Zustandsschaubild stellt den Existenzbereich einer **Gefügeart bzw. eines Aggregatzustandes** dar. Die Linien markieren den Übergang von einer Gefügeart zur anderen. Die wichtigen End- und Schnittpunkte von Linien sind mit Großbuchstaben benannt.

Betrachtet man die Aggregatzustands- und Gefügebereiche systematisch, indem man von Eisenschmelzen unterschiedlichen Kohlenstoffgehalts ausgeht (der Bereich oberhalb der Linie A-C-D), so kann man folgendes feststellen:

### Oberhalb der Linie A-C-D:

Bei Temperaturen über der Linie A-C-D sind alle Eisen-Kohlenstoff-Werkstoffe flüssig (Schmelze).

### Bei Unterschreiten der Linie A-C-D:

Fällt die Temperatur der Werkstoffe unter die Linie A-C-D, beginnt ein teilweises Erstarren durch Ausscheiden einzelner Kristalle aus der Schmelze. Je nach C-Gehalt fallen unterschiedliche Kristalle aus:

- Bei einem C-Gehalt von **0% bis 4,3%** bilden sich **Austenitkristalle** mit einem **kubisch-flächenzentrierten Kristallgitter**. Bei weiterer Abkühlung fallen immer mehr Austenitkristalle aus, bis bei Erreichen der Linie A-E-C die ganze Schmelze erstarrt ist.
- Eisenschmelzen mit **4,3 bis 6,67% C** bilden nach Unterschreiten der Linie C-D bei **rascher** Abkühlung **Zementitkristalle**, bei langsamer Abkühlung auch Graphit. Bei weiterer Abkühlung schreitet die Ausscheidung voran, bis die Schmelze bei der Linie C-F (rund 1150°C) völlig erstarrt ist.
- Eine Sonderstellung nimmt die Eisenschmelze mit **4,3% Kohlenstoff** ein: Sie erstarrt wie ein reines Metall vollständig bei einer Temperatur von 1150°C zu einem feinkörnigen Gefüge, das **Ledeburit** genannt wird.

Solch ein **Schmelzpunktminimum** einer Legierung heißt **Eutektikum**.

### Bei weiterer Abkühlung:

Kühlt die nunmehr erstarrte Eisen-Kohlenstoff-Legierung weiter ab, kommt es je nach C-Gehalt zu unterschiedlichen Vorgängen:

- Eisen-Werkstoffe mit **bis 2,06% C**, die **Stähle**, bestehen nach dem Erstarren aus Austenit.

- Bei einem C-Gehalt **bis 0,83%** bezeichnet man die Legierungen als **untereutektoid**. Bei Abkühlung unter die Linie G-S entsteht zunächst Ferrit und bei weiterer Abkühlung unter die Linie P-S Perlit, so dass diese Stähle unterhalb 723°C ein Gefüge aus **Ferrit und Perlit** besitzen.

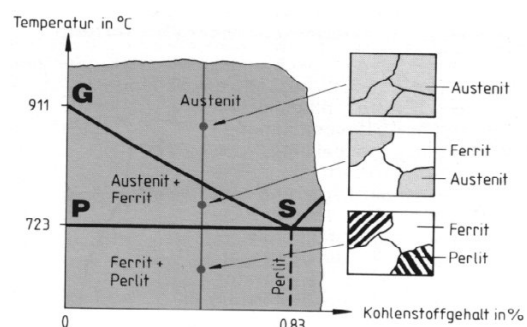


Abb.19: Abkühlung einer untereutektoiden Legierung

- Stahl mit genau **0,83% C (eutektoide Zusammensetzung)** wandelt sich bei Abkühlung (Abb.20) unter 723°C vom Austenit in **reines Perlitgefüge** um.

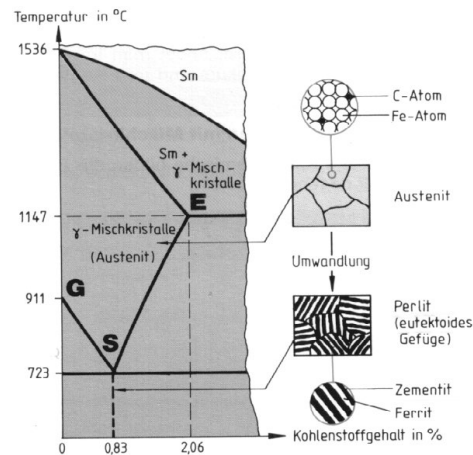
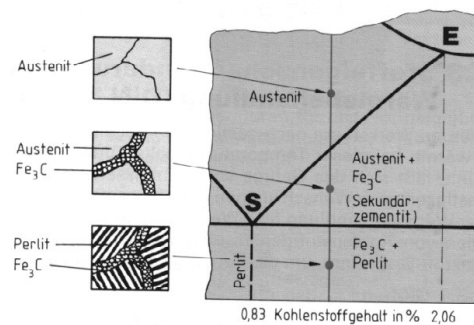


Abb20: Abkühlung einer eutektoiden Legierung

- Bei einem C-Gehalt von **0,83 bis 2,06%** spricht man von **übereutektoiden** Legierung. Bei der Abkühlung (Abb.21) entsteht aus dem Austenit bei Unterschreiten der Linie S-E zunächst Korngrenzenzementit und bei weiterer Abkühlung unter die 723°C-Linie Perlit. Diese Stähle bestehen unterhalb 723°C aus Perlit, umgeben von **Korngrenzenzementit**.

Abb.21: Abkühlung einer übereutektoiden Legierung



• Eisen-Werkstoffe mit einem C-Gehalt von **2,06% bis 4,3% (Gusseisen)** erstarren über die Zwischenstufe Austenit, je nach Abkühlungsgeschwindigkeit zu **Perlit** und **Ledeburit** oder **Ferrit/Perlit** und **Graphit**.

### 4 Aufgaben

1. Welche Gefügearten kommen in Stahl bei Raumtemperatur vor?
2. Welchen inneren Aufbau bildet die Legierung Austenit?
3. Welches Gefüge hat Stahl mit 0,83 % Kohlenstoff bei Temperaturen über bzw. unter 723°C?
4. Welche Gefügebestandteile enthält Gusseisen bei Raumtemperatur?
5. Welchen Kristallgittertyp hat
  - a)  $\alpha$ -Eisen (Ferrit)?
  - b) Austenit?
6. Welches Gefüge hat Stahl mit 0,4% Kohlenstoff bei Raumtemperatur?
7. Wie verändert sich das Gefüge von Stahl mit 0,3% Kohlenstoff beim Erwärmen von Raumtemperatur auf 1000°C?
8. Die nebenstehenden Gefügebilder gelten für Stahl (unbekannter Temperatur):
  - a) Bezeichne nebenstehende Gefüge und Gefügebestandteile.
  - b) Ordne die Bilder, soweit möglich, nach zunehmendem Kohlenstoffgehalt.
  - c) Jeweils eines der drei Gefüge ist „rein perlitisch“, „übereutektoid“ bzw. „untereutektoid“. Ordne den Abbildungen die Begriffe zu.



## **III Energietechnik**

### **A Grundlagen**

#### **1 Einführung**

Mit dem **Begriff Energie** kann intuitiv jeder etwas anfangen. Schließlich ist Energie mit Leben im weitesten Sinne untrennbar verbunden, da ohne Energie kein Leben möglich ist. Man verbindet mit diesem Wort im menschlichen Bereich Aussagen wie: Tatkraft, Wirkungen erzeugen, Durchhaltevermögen, Schwung usw. Aber auch im naturwissenschaftlich-technischen Zusammenhang hat jeder eine Vorstellung von dem, was mit Energie gemeint ist. Zum Heizen braucht man Energie, ebenso zum Autofahren, zum Herstellen von Gütern, zum Hochheben von Lasten u.s.w.

Trotz dieses anschaulichen Zugangs zu dem Begriff Energie handelt es sich um einen außerordentlich vielschichtigen Begriff. Man kann das Thema Energie unter den verschiedensten Aspekten diskutieren, die aber letztlich alle zusammenhängen:

Zunächst sind da die **physikalischen Grundlagen** des Energiebegriffs zu nennen. Es gibt Naturgesetze, die das Umwandeln von Energie bestimmen. Energie ist sogar zu einem zentralen Begriff der Physik geworden. Man denke nur an die fundamentale Bedeutung des bekannten Energieerhaltungssatzes.

Energie spielt aber auch in der **Technik** eine herausragende Rolle. Viele Ingenieure beschäftigen sich mit der Nutzbarmachung von Energie in den unterschiedlichsten Bereichen und versuchen die Effizienz der Energienutzung mit technischen Mitteln zu verbessern. Zudem wird versucht, neue Energietechniken zu entwickeln und serienreif zu machen.

Natürlich hat die Energie auch eine sehr große **ökonomische Bedeutung**. Die Energiewirtschaft hat Umsätze zu verzeichnen und tätigt Investitionen, die weit über denen anderer Industriezweige liegen. Sie stellt national und international einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor dar. Ohne ausreichende Energieversorgung wäre der hohe materielle Lebensstandard in den Industrieländern nicht möglich.

Neben diesen technisch-wirtschaftlichen Betrachtungen sind **die politischen und gesellschaftlichen Bedeutungen** der Energie unübersehbar. Ein hochindustrialisiertes Land wie die Bundesrepublik Deutschland, das den größten Teil seines Energiebedarfs durch Importe decken muss, ist auf die Zusammenarbeit mit den energiereichen, zurzeit insbesondere das Erdöl exportierenden Staaten angewiesen. Wie abhängig Deutschland und andere westeuropäische Länder von Energieeinfuhren sind, hat das Erdölembarago (staatlicher Ausfuhrstopp) der OPEC-Staaten (Kürzel für den Zusammenschluss bestimmter, vor allem arabisches Erdöl exportierender Staaten) 1973 exemplarisch gezeigt. Die sichtbarste Auswirkung, die das Zudrehen des Ölhahnes in westlichen Ländern hatte, waren staatlich verordnete Autofahrverbote an mehreren Sonntagen, um Erdöl zu sparen.

Andere Auswirkungen waren explosionsartig ansteigende Energiekosten, insbesondere für Mineralölprodukte, und als Folge davon eine Wirtschaftskrise mit weltweiten Ausmaßen und vielen Arbeitslosen.

---

Hinweis zum Kapitel „Energietechnik“:

Auszüge aus Alfred Böge:  
Mechanik und Festigkeitslehre  
Viewegs Fachbücher der Technik  
ISBN 3-528-94010-7

Reinhard Schuberth:  
Energie  
Handwerk und Technik  
ISBN 3.582.02714.7 (HT 2714)



Aber nicht nur außenpolitisch, sondern auch **gesellschaftspolitisch** hat das Thema allerhöchste Brisanz. Es gibt nur wenige Themen, die derart kontrovers diskutiert werden wie das der Energieversorgung. Nicht erst seit der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl (1986) stehen sich in allen Ländern die verschiedenen Standpunkte unversöhnlich gegenüber. Die Auseinandersetzungen um die richtige Energieversorgung erinnern oft mehr an einen Glaubenskrieg, wo sachliche Argumente kaum mehr wahrgenommen werden. Sicherlich kommt diese aggressive Auseinandersetzung auch daher, weil Entscheidungen über Energiesysteme außerordentlich langfristige Wirkungen haben, die sich oft erst nach mehreren Generationen wieder korrigieren lassen, wenn überhaupt. Jahrzehnte sind da meist die kleinste Zeiteinheit, in der Entscheidungen vorausgeplant werden müssen.

Das gravierendste Problem der durch Menschenhand umgesetzten Energien ist jedoch das **Umweltproblem**. Bis Anfang der 70er Jahre nahm man überhaupt nicht wahr, daß es sich bei den allermeisten Energieträgern um erschöpfliche Rohstoffe handelt, die wir unwiederbringlich verfeuern. Erst das bereits erwähnte Erdölebargo (1973) und der Bericht des Club of Rome über die „Grenzen des Wachstums“ (1972) brachten ein Umdenken und führten zu merklichen Energieeinsparungen.

Es gelangte erst allmählich ins öffentliche Bewusstsein, dass nicht nur mit der Kernenergie, sondern auch mit dem exzessiven Verbrennen von Kohle, Öl und Gas Umweltschäden verbunden sind, die das Überleben der Menschheit auf dem „Raumschiff Erde“ in Frage stellen können. Verschärft wird diese Situation noch durch die bislang unaufhaltsam wachsende Weltbevölkerung. Im Jahr 2000 werden wahrscheinlich 7 Milliarden Menschen auf der Erde leben und Energie benötigen, 1987 waren es nur 5 Mrd. und 1950 sogar erst 2,5 Mrd.

Es muss hier angemerkt werden, dass die Bevölkerungszahlen in erster Linie in den Ländern der Dritten Welt stark zunehmen und dass der Pro-Kopf-Energieverbrauch in diesen nur einen Bruchteil des Pro-Kopf-Energieverbrauchs der Industrieländer beträgt. Aber natürlich haben die Menschen dieser Länder das Ziel, den Industrieländern nachzueifern - wer könnte es ihnen verdenken.

Waren bis vor kurzem Themen wie **Waldsterben**, **saurer Regen** und **Luftverschmutzung** in aller Munde, so sind derzeit **Treibhauseffekt** und im Gefolge davon **globale Klimaänderungen** die Horrorszenarien der Zukunft. Ein Abschmelzen der Polkappen und ein damit verbundenes Ansteigen des Meeresspiegels wird von Klimaforschern nicht mehr ausgeschlossen. Eines scheint ziemlich sicher: Die Menschheit, und allen voran die Industrieländer, stillt derzeit ihren Energiehunger auf Kosten zukünftiger Generationen, denen irreparable Umweltschäden und geplünderte Ressourcen (Vorräte) hinterlassen werden. Zudem sind diese Schäden nicht örtlich abgegrenzt wie früher, sondern globaler Natur.

Trotz oder gerade wegen der düsteren Zukunftsaussichten sind sachliche und fundierte Informationen über die Zusammenhänge zu diesem Thema erforderlich. In diesem Kapitel werden schwerpunktmäßig die technisch-naturwissenschaftlichen Sachverhalte und die ökologischen Folgeerscheinungen, die im Zusammenhang mit der anthropogenen (von Menschen verursachten) Energieumwandlung auftreten, dargestellt. Diese Kenntnisse sollten auch zu einer Versachlichung der Energiediskussion und einer rationaleren Beurteilung der Situation führen können.

## 2 Grundbegriffe der Energietechnik

Zur angemessenen Auseinandersetzung mit dem Thema Energie ist - wie in anderen Wissensbereichen auch - eine gewisse Fachsprache erforderlich. Die präzise Kenntnis der verwendeten Begriffe ermöglicht erst die Kommunikation über die zugrundeliegenden Sachverhalte.

### 2.1 Erscheinungsformen der Energie

Genau zu definieren, was Energie eigentlich ist, fällt schwer. Es soll deshalb zunächst angegeben werden, in welchen Formen Energie auftreten kann. Diese aus der Physik bekannten Erscheinungsformen der Energie sind im Wesentlichen:

#### • mechanische Energie

Hier ist die in der Physik übliche Unterscheidung von *potentieller* und *kinetischer Energie* wichtig. Die Spannungsenergie (Verformungsenergie) elastischer Körper spielt in der Energietechnik eine unbedeutende Rolle.





Potentielle Energie oder Lage- oder Höhenenergie hat beispielsweise eine Wassermenge, die sich im Hochbecken eines Speicherstausees befindet. Kinetische oder Bewegungsenergie besitzt das Wasser, wenn es vom Hochbecken zum Talbecken fließt.

- **chemische Energie**

Das ist die in den chemischen Bindungen zwischen den Atomen steckende Energie, die bei chemischen Reaktionen zugeführt (endotherm) oder abgegeben (exotherm) wird. Ein Beispiel für eine exotherme Reaktion, bei der chemische Bindungsenergie frei wird, ist die Verbrennung, beispielsweise von Kohle.

- **elektrische Energie**

Das ist die Energie, die durch elektrische Ladungen hervorgerufen wird. Sie kann in statischer Form in den Platten eines Kondensators gespeichert sein oder in dynamischer Form durch die Bewegung elektrischer Ladungen zum Ausdruck kommen. Die elektrische Energie ist naturgesetzlich sehr eng mit der magnetischen Energie verknüpft. Man spricht deshalb in der Physik auch von elektromagnetischer Energie. Weil das in der Technik nicht üblich ist, wurde hier nur der Oberbegriff elektrische Energie gewählt. Die elektrische Energie spielt in der Energietechnik eine wichtige Rolle.

- **elektromagnetische Strahlungsenergie**

Dies meint die Energie der elektromagnetischen Wellen oder Strahlen, also z. B. die Strahlungsenergie des Sonnenlichts. Die elektromagnetischen Strahlen sind aber keinesfalls auf die sichtbaren Strahlen, das Licht, zu beschränken. Hierzu gehören auch die Wärmestrahlung, die Radiowellen usw.

- **Kernenergie**

Im Gegensatz zur chemischen Energie, welche die Bindungsenergien in den Atomhüllen beschreibt, ist bei der Kernenergie die Bindungsenergie in den Atomkernen gemeint, also die Bindungsenergie zwischen den Protonen und Neutronen eines Atomkerns. Diese Energie kann mit geeigneten Kernreaktionen z. T. freigesetzt werden.

- **Wärmeenergie**

Was Wärmeenergie oder thermische Energie bedeutet, ist jedem zugänglich, da der Mensch diese Energieform unmittelbar spürt. Heute weiß man, daß Wärmeenergie letztlich die ungeordnete Bewegungsenergie der Atome oder Moleküle des erwähnten Stoffes ist. Diese Modellvorstellung der modernen Physik ist für energietechnische Betrachtungen allerdings weniger wichtig. Die Wärmeenergie nimmt unter den Energieformen eine Sonderrolle ein, da sich die anderen Energieformen zwar vollständig in Wärmeenergie umwandeln lassen, umgekehrt sich Wärmeenergie aber nur eingeschränkt in andere Energieformen umwandeln läßt.

## 2.2 Energieerhaltung

Im Prinzip können die verschiedenen Erscheinungsformen der Energie ineinander umgewandelt werden. Diese **Energieumwandlungen** unterliegen gewissen naturgesetzlichen Einschränkungen, auf die im Kapitel Thermodynamik eingegangen wird. Einer der zentralen Sätze der Physik ist der sogenannte **Energieerhaltungssatz**. Diese aus der Erfahrung gewonnene Aussage besagt, dass die Menge der Energie, über alle Energieformen hinweg, immer gleich groß ist.

### **Satz von der Erhaltung der Energie:**

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, sie kann lediglich von einer Form in eine andere umgewandelt werden.

### **Andere Formulierung des Energieerhaltungssatzes:**

Die Summe aller im Universum vorhandenen Energien bleibt erhalten (konstant); Energie kann weder aus Nichts gewonnen werden, noch geht sie verloren. Energie kann nur umgewandelt werden.

Es gibt noch weitere Formulierungen des Energieerhaltungssatzes, auf die im Kapitel Thermodynamik eingegangen wird.



Zunächst allerdings scheint der Energieerhaltungssatz der **Alltagserfahrung** zu widersprechen: Schließlich müssen wir für Energie bezahlen, obwohl sie nach dem Energieerhaltungssatz nicht vernichtet bzw. verbraucht werden kann! Alle sprechen vom Energieverbrauch, sei es der vom Auto, vom Kühlschrank oder der Deutschlands. Wozu braucht man Kraftwerke, wenn ohnehin keine Energie erzeugt werden kann? Wieso kann Energie knapp sein? Wenn sie weder erzeugt noch vernichtet werden kann, muss sie doch in immer gleicher Menge zur Verfügung stehen.

Der Energieerhaltungssatz steht nur scheinbar im Widerspruch zu den oben genannten Fragen. Zwar wird Energie tatsächlich **nicht verbraucht**, sie wird **aber entwertet**. Hier bietet sich ein Vergleich mit dem in einem Haushalt verbrauchten Wasser an. Obwohl im Prinzip genau die gleiche Wassermenge, die der Wasserleitung entnommen wird, über den Kanal wieder abfließt, spricht man von Wasserverbrauch. Die Anzahl der entnommenen Liter Frischwasser entspricht aber genau der Anzahl der Liter des abgegebenen Schmutzwassers. Eigentlich wurde kein Wasser verbraucht, es wurde nur verschmutzt bzw. entwertet und kann so nicht wieder dem Versorgungsnetz zugeführt werden. Beim sogenannten Energieverbrauch ist es genauso: Wird 1 kWh elektrische Energie aus dem Stromversorgungsnetz bezogen und wird diese mit dem Elektroherd in Wärmeenergie umgewandelt, so erhält man genau 1 kWh Wärmeenergie, womit man Speisen zubereiten kann. Diese Wärmeenergie verflüchtigt sich letztlich an die Umgebung und kann nicht mehr ohne weiteres zurückgeholt werden. Es findet eine **Energieentwertung** statt: Aus der 1 kWh hochwertiger elektrischer Energie wurde 1 kWh niederwertiger Umgebungsenergie, mit der in Zukunft keine Speisen mehr zubereitet werden können.

**Energieverbrauch** bedeutet also letztlich die Umwandlung **hochwertiger Energieformen** in **niederwertige**.

Mit **Energieerzeugung** ist das **Verfügbarmachen hochwertiger Energieformen** gemeint.

Die niederwertige Energieform ist Wärmeenergie, ihr Wert ist umso geringer, je weniger sich ihre Temperatur von der Umgebungstemperatur unterscheidet.

## 2.3 Energiewandler und Wirkungsgrad

Die Systeme, mit denen die Energiewandlung vorgenommen wird, bezeichnet man in der Fachsprache als **Energiewandler**. Kraftwerke, Generatoren, Motoren, Elektroherde usw. sind also streng genommen Energiewandler und keine Energieerzeuger bzw. Energieverbraucher, wie sie in der Umgangssprache manchmal bezeichnet werden

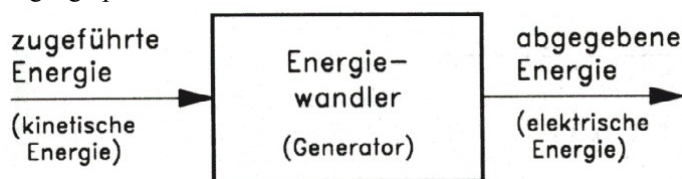


Abb. 1: Systemdarstellung eines Energiewandlers

### Aufgabe 1:

Trage in der nachfolgenden Tabelle zu allen Umwandlung je mindestens einen Energiewandler ein.

↗	Mechanische E.	Elektrische E.	Chemische E.	Thermische E.
Mechanische Energie				
Elektrische Energie				
Chemische Energie				
Thermische Energie				

Zwar bleibt nach dem Energieerhaltungssatz bei einer Energiewandlung die Gesamtenergie konstant, jedoch ist es das technische Ziel der Umwandlung, eine ganz bestimmte Energieform, z. B. elektrische Energie, zu erhalten.

**Energieflußbilder**

Energieröme und auftretende Verluste lassen sich übersichtlich mit Hilfe von Energieflußbildern darstellen.

Derartige Energieflußbilder, die Stoff- oder Energiemengen längs einer Prozesskette darstellen, werden auch SANKEY-Diagramme genannt. Die Breite des gezeichneten Mengenflusses ist dabei zu der jeweiligen Menge proportional.

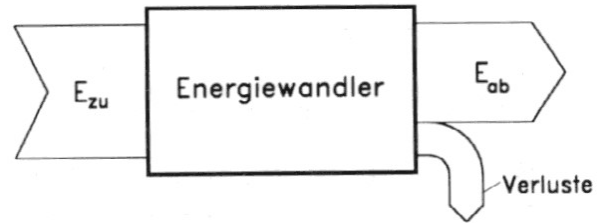


Abb.2: SANKEY-Diagramm (Energieflußbild) eines Energiewandlers

**Aufgabe 2:**

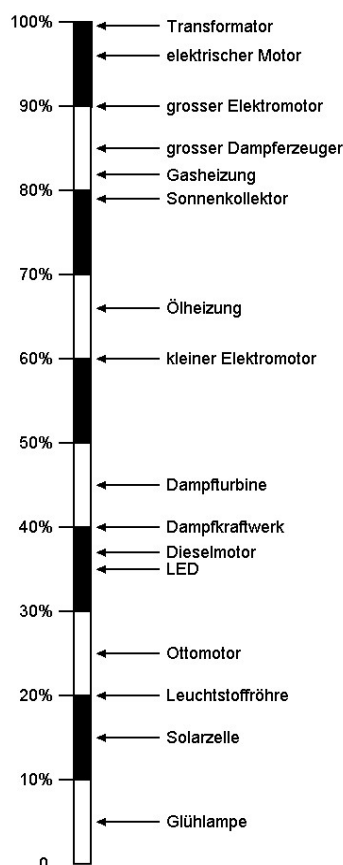
Wie groß ist der Wirkungsgrad des Energiewandlers aus Abb. 2?

Gewissermaßen als Nebeneffekt der Umwandlung entstehen praktisch auch immer andere, mit der Wandlung nicht beabsichtigte Energieformen, insbesondere Wärmeenergie, beispielsweise durch Reibung. Diese nicht gewünschten Energieanteile bezeichnet man in der Technik als Verluste. Als Gütemaß für eine Energiewandlung definiert man den Wirkungsgrad  $\eta$  (Eta).

Der **Wirkungsgrad  $\eta$**  ist das Verhältnis der abgegebenen Energie  $E_{ab}$  zur zugeführten Energie  $E_{zu}$ .

$$\eta = \frac{E_{ab}}{E_{zu}}$$

$\eta$ : Wirkungsgrad (ohne Einheit)  
 $E_{ab}$ : Abgegebene Energie in J  
 $E_{zu}$ : Zugeführte Energie in J



Da stets  $E_{ab} < E_{zu}$  ist  $\eta$  eine dimensionslose Zahl kleiner als 1;  $\eta = 1$  ist der theoretische Grenzfall, dem manche reale Energiewandler recht nahe kommen (vgl. Abb. 3). Häufig gibt man den Wirkungsgrad in Prozent an, dann ist der mit obiger Formel berechnete Zahlenwert noch mit 100 % zu multiplizieren.

Ein Wirkungsgrad von 0,8 bzw. 80 % bedeutet, daß die dem Energiewandler zugeführte Energie zu 80 % in die gewünschte Energieform umgewandelt wird und 20 % Verluste auftreten.

In nebenstehender Abbildung (Abb.3) sind typische Werte für die Wirkungsgrade einiger wichtiger Energiewandler angegeben. Es zeigt sich deutlich, daß bei Energiewandlern mit Wärme als zugeführter Energie die Wirkungsgrade vergleichsweise niedrig sind. Dies liegt **nicht an schlechter Technik**, sondern ist **thermodynamisch bedingt**.

Abb.3: Typische Wirkungsgrade einiger Energiewandler und -wandlungsketten

## 2.4 Energiewandlungskette

Bei der technischen Energieversorgung sind in der Regel mehrere Energieumwandlungen hintereinander erforderlich. Auf diese Weise entsteht eine Energiewandlungskette. Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt die wichtigsten Wandlungen bei der Stromerzeugung in einem Kohlekraftwerk.

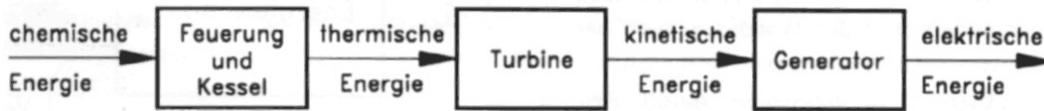


Abb.4: Energiewandlungskette

Bei der oben dargestellten Energiewandlungskette wird zunächst die chemische Energie der Kohle mit Hilfe des Energiewandlers Feuerung und Kessel in Wärmeenergie des Wasserdampfes umgewandelt. Der nächste Energiewandler, die Dampfturbine, wandelt diese thermische Energie in kinetische Energie der rotierenden Welle der Turbine um. An die Turbinenwelle ist der Generator angekoppelt, der schließlich die kinetische Energie der sich drehenden Welle in elektrische Energie umwandelt.

### Aufgabe 3:

Berechne den Gesamtwirkungsgrad des Kohlekraftwerkes

Um herzuleiten, wie sich der Gesamtwirkungsgrad einer Energiewandlungskette aus den Einzelwirkungsgraden zusammensetzt, wird noch einmal auf Abb. 4 mit den dortigen Bezeichnungen Bezug genommen. Die Einzelwirkungsgrade der Teilsysteme werden der Reihe nach mit  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  und  $\eta_3$  bezeichnet, sodass gilt:  $\eta_1 = E_{\text{therm}}/E_{\text{chem}}$ ,  $\eta_2 = E_{\text{kin}}/E_{\text{therm}}$  und  $\eta_3 = E_{\text{elektr}}/E_{\text{kin}}$ . Für den Gesamtwirkungsgrad gilt nach Definition:  $\eta = E_{\text{elektr}}/E_{\text{chem}}$ . Genau diesen Quotienten erhält man, wenn man die drei Einzelwirkungsgrade miteinander multipliziert, da sich dann sämtliche „Zwischenenergien“ herauskürzen.

Deshalb gilt:

Der **Gesamtwirkungsgrad**  $\eta_{\text{ges}}$  einer Energiewandlungskette ist das Produkt der Einzelwirkungsgrade.

$$\eta_{\text{ges}} = \prod_{i=1}^n \eta_i$$

$\eta_{\text{ges}}$ : Wirkungsgrad der Energiewandlungskette  
 $\eta_i$ : Wirkungsgrad einzelner Energiewandler

Das bedeutet, da jeder Einzelwirkungsgrad  $< 1$ , daß der Gesamtwirkungsgrad kleiner als der kleinste Einzelwirkungsgrad ist.

### Beispiel

Für die in Abb.4 dargestellte Energiewandlungskette „Kohlekraftwerk“ ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von  $\eta = 0,37$ . Das heißt aber, daß bei 100 Tonnen verfeuerter Kohle nur 37 Tonnen in Form von elektrischem Strom das Kraftwerk verlassen. Der Energieinhalt von 63 Tonnen Kohle geht bei der Umwandlung „verloren“!

## 2.5 Energieversorgungssysteme

### Energiebegriffe

Um für den Endverbraucher Energiedienstleistungen wie z. B. geheizte Räume, Licht, Transport von Menschen und Gütern, Kommunikation usw. anbieten zu können, stehen hochentwickelte Energieversorgungssysteme zur Verfügung. Sie bereiten die in der Natur vorkommenden Energieträger so auf bzw. wandeln sie um, dass die Energie gespeichert, transportiert und beim Endverbraucher sinnvoll genutzt werden kann. Als Beispiel sei das flächendeckende elektrische Energieversorgungssystem genannt, das vom Abbau von Kohle oder Uran über Kraftwerke und Hochspannungsleitungen bis zur Steckdose in der Wohnung dafür sorgt, dass rund um die Uhr beim Endverbraucher elektrische Energie zur Verfügung steht. Die in Versorgungssystemen auftretenden Energien haben die folgenden Fachbegriffe:

### Primärenergie

Energie, die von der Natur unmittelbar zur Verfügung gestellt wird, bezeichnet man als Primärenergie. Da die in der Natur vorkommenden Energien häufig an einen Stoff gebunden sind, spricht man auch von Energieträgern, in diesem Zusammenhang dann von Primärenergieträgern.

Die Primärenergie wiederum teilt man ein in:

- fossile Energieträger: Kohle, Erdöl und Erdgas,
- regenerative oder erneuerbare Energien, wie Sonne, Wind und Wasser, aber auch Biomasse, und
- Kernbrennstoffe, wie z. B. Uran.

Gegenwärtig deckt Deutschland seinen Primärenergiebedarf zu fast 90 % mit fossilen Energieträgern; auch weltweit sind es an die 90 % fossile Energieträger, die zurzeit den Energiebedarf der Menschheit decken.

### Sekundärenergie

Ein Teil der Primärenergieträger ist zum Transport, zur Speicherung und/oder zur Umwandlung wenig geeignet. Sie werden deshalb zunächst zu so genannten Sekundärenergieträgern veredelt. Beispielsweise werden die Primärenergieträger Kohle, Erdöl in die Sekundärenergieträger Briketts, Benzin bzw. Heizöl umgewandelt. Ein besonders weit verbreiteter Sekundärenergieträger, der durch Veredlung aus verschiedenen Primärenergieträgern hergestellt wird, ist der elektrische Strom. Es müsste physikalisch korrekt natürlich „die elektrische Energie“ heißen. Es hat sich aber in der Umgangssprache wie auch in der Technik eingebürgert häufig von elektrischem Strom zu reden, obwohl elektrische Energie gemeint ist.

Der elektrische Strom eignet sich gut für verlustarmen Transport und besitzt ausgezeichnete Umwandlungsmöglichkeiten in andere Energieformen.

### Endenergie

Die Sekundärenergieträger und der Teil der Primärenergieträger, der nicht veredelt werden muss, stellen zusammen die so genannte Endenergie dar, die beim Endverbraucher zur Nutzung ansteht.

### Nutzenergie

Schließlich wird die Endenergie beim Verbraucher in Nutzenergie umgewandelt, die er zur unmittelbaren Bedürfnisbefriedigung nutzt. Dabei lassen sich folgende Nutzenergieformen unterscheiden:

- Wärme
- mechanische Energie
- Licht
- Energie zur Information und Kommunikation

## Energiewandlung

Die Energieströme bei der Energieumwandlung in einem Kraftwerk sind in Abb. 5 dargestellt.

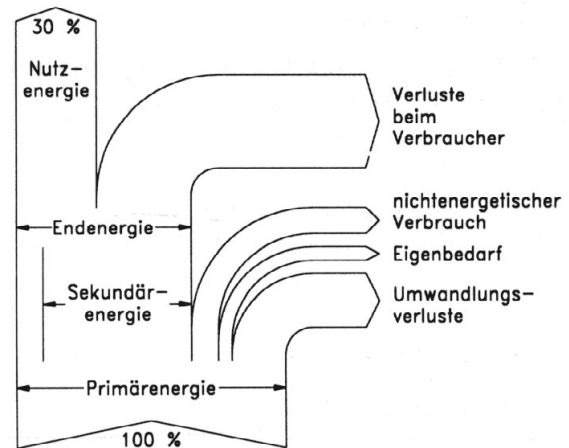


Abb.5: SANKEY-Diagramm (Energieflussbild)

Es ist deutlich zu erkennen, daß alle Umwandlungen mit Verlusten behaftet sind.

Der durchschnittliche Gesamtwirkungsgrad, mit dem Primärenergie in Nutzenergie umgewandelt wird, beträgt national etwa 30%, weltweit gesehen sogar nur 10%.

Diese Zahlen zeigen zugleich zwei Wege auf, um mit Primärenergie sparsamer umzugehen:

Zum einen sollten alle technischen Möglichkeiten genutzt werden, um diese niedrigen Gesamtwirkungsgrade zu erhöhen. Gelänge es, den weltweiten Wirkungsgrad auf bescheidene 20 % zu verdoppeln, so würde die Hälfte der bisherigen Primärenergie genügen, um die gleichen Energiedienstleistungen wie bisher anbieten zu können.

Zum anderen bedeuten diese Wirkungsgrade, wenn 1 Kilowattstunde Nutzenergie nicht abgerufen wird, dass in das nationale Energieversorgungssystem 3 Kilowattstunden weniger an Primärenergie eingespeist werden müssen, in das weltweite sogar 10 Kilowattstunden weniger. Das heißt, daß sich das **Sparen von Nutzenergie** außerordentlich lohnt, weil es sich verdrei- bzw. sogar verzehnfacht, wenn man die Umwandlungsverluste berücksichtigt.

## 3 Physikalische Grundlagen, Maßeinheiten

Um ein tieferes Verständnis der Energie zu erhalten, benötigt man Maßeinheiten, mit denen sich Energie messen läßt. Dazu sind einige physikalische Grundlagen erforderlich, wie sie üblicherweise aus dem Physikunterricht bekannt sein dürften.

### 3.1 Energie

Physikalisch besteht folgender Zusammenhang zwischen Arbeit und Energie:

**Energie** ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten.

Wenn ein System (z.B. Körper oder abgegrenzter Bereich einer Anlage) Energie besitzt, dann ist in ihm Arbeit gespeichert. Die Energie sagt deshalb etwas über den Zustand aus, in dem sich ein System befindet.

#### Aufgabe 4:

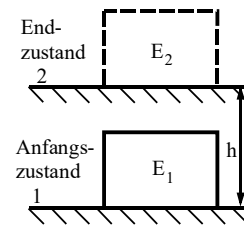
Vervollständige nachfolgende Tabelle.

System	Zustand	Energie
Auto	Fahrend	groß
	Stehend	
Wassermenge	im Hochbecken	
	im Talbecken	
Kochtopf	Heiß	
	kalt	

Abb.6: Energie als Zustandsgröße

Wie aus Abb. 6 ersichtlich, beschreibt die Energie den Zustand von Systemen, sie ist deshalb eine **Zustandsgröße**.

In rein mechanischen Systemen kann der Zustand eines Systems nur durch Arbeit verändert werden. Betrachtet man einen Körper im Schwerfeld der Erde, der von einem Anfangszustand 1 (am Boden liegend) in den Endzustand 2 (um die Höhe h hochgehoben) gebracht wird (vgl. Abb.7), so entspricht die Differenz der Energie von End- und Anfangszustand genau der Arbeit, die beim Hochheben aufgebracht wird.



$$W = E_2 - E_1 = \Delta E$$

Die Formel zeigt, daß Arbeit und Energie die gleiche Einheit haben, d.h. Energie wird ebenfalls in Joule gemessen.

Abb.7: Zusammenhang von Arbeit und Energie

Es ergibt sich zugleich eine wichtige **Vorzeichenfestlegung**:

$\Delta E > 0$  (positives Vorzeichen +): Es wird Arbeit **am System verrichtet** oder, wie man auch sagt, dem System wird Energie **zugeführt** ( $E_2 > E_1$ ).

$\Delta E < 0$  (negatives Vorzeichen -): Das **System verrichtet** Arbeit oder, wie man auch sagt, das System **gibt Energie ab** ( $E_2 < E_1$ ).

In der nachfolgenden Abbildung 8 sind die Größenordnungen einiger Energien dargestellt:

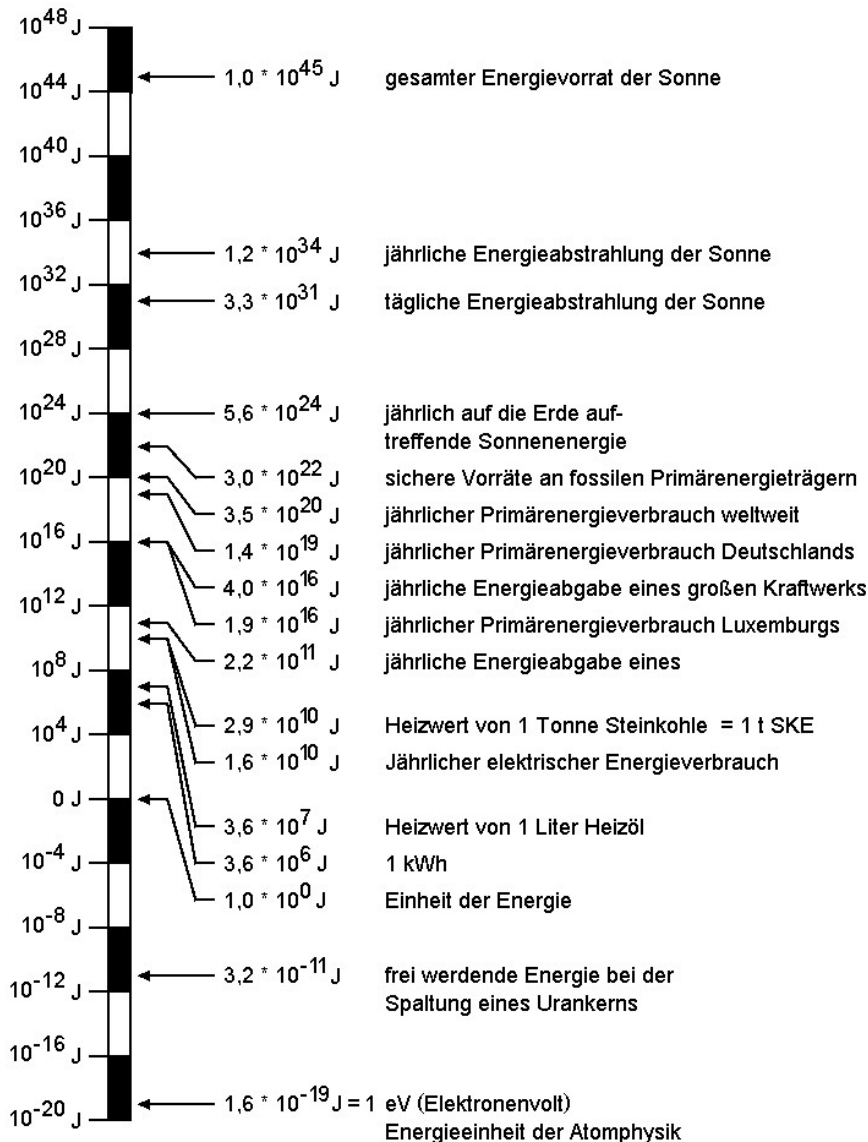


Abb.8: Größenordnung einiger Energien



### 3.2 Maßeinheiten

Da die Einheit J für die Energie in der Energietechnik bislang wenig verwendet wird, leiten wir noch andere Einheiten her.

#### • eV

Die physikalische Grundeinheit 1 eV (Elektronenvolt) ist die Energiemenge, um die die kinetische Energie eines Elektrons zunimmt, wenn es die Spannungsdifferenz 1 V durchläuft.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

#### • Ws und kWh

In der Physik definiert man Leistung  $P$  als Arbeit durch Zeit  $t$ . Die Formel nach der Arbeit  $W$  aufgelöst, ergibt:  $W = P \cdot t$ , wobei die Leistung in  $W$  (Watt) gemessen wird. Demzufolge kann die Arbeit auch in  $Ws$  (Wattsekunden) statt in  $J$  angegeben werden.

Für Energie sind Kilowattstunden (kWh) üblich.

Es gilt:  $1 \text{ kWh} = \dots$

#### • SKE (oder tec)

In der Energiewirtschaft spielt insbesondere noch die Steinkohleeinheit (SKE) eine wichtige Rolle. Die Energiemenge, die man erhält, wenn man 1 kg Steinkohle verheizt, bezeichnet man als 1 kg SKE.

$$\text{Es gilt: } 1 \text{ kg SKE} = 29,3 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Entsprechend wird auch die Tonne Steinkohleeinheit (t SKE) verwendet, wobei  $1 \text{ t SKE} = 10^3 \text{ kg SKE}$  (tec, „tonne-équivalent-charbon“) ist.

#### • tOE oder tep

Analog wird die tOE (Tonne Öleinheit) (tep, „tonne-équivalent-pétrole“) definiert.

$$\text{Es gilt: } 1 \text{ t OE} = 1 \text{ tep} = 41,868 \text{ GJ}$$

#### • cal und kcal

Die veraltete Einheiten cal (Kalorie) bzw. kcal (Kilokalorie) sollten nicht mehr verwendet werden.

$$\text{Umrechnung: } 1 \text{ cal} = 4,187 \text{ J}$$

#### Aufgabe 5:

Vervollständige nachfolgende Tabelle mit den wichtigsten Energieeinheiten und ihrer Umrechnung in J bzw. kWh:

Einheit	1 Ws = 1 Nm	1 kWh	1 eV	1 kcal	1 t SKE	1 tOE (tep)
In J						
In kWh						



### 3.3 Formeln zur Energieberechnung

#### Potentielle Energie $E_{\text{pot}}$ und Hubarbeit $W_h$

Wird ein Körper von der Masse  $m$  um die Höhe  $h$  gegenüber einer Bezugsebene gehoben, dann ist dazu die **Hubarbeit  $W_h$**  erforderlich. Dabei ändert sich seine **potentielle Energie** (oder Höhenenergie)  $E_{\text{pot}}$  genau um diesen Betrag.

$$E_{\text{pot}} = W_h = m \cdot g \cdot h$$

$E_{\text{pot}}$ : potentielle Energie in J  
 $W_h$ : Hubarbeit in J  
 $m$ : Masse in kg  
 $g$ : Erdbeschleunigung,  
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$   
 $h$ : Höhe in m

Das ist die Energie oder Arbeitsfähigkeit, mit der der Körper nun an einem anderen Körper Arbeit verrichten kann. Er kann z.B. über Seil und Rolle einen anderen Körper heben.

Besitzt der Körper schon die potentielle Energie  $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h_1$  gegenüber der um  $h_1$  tiefer liegenden Bezugsebene, dann ist zum weiteren Heben auf die Höhe  $h_2$  die Hubarbeit  $W_h = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$  erforderlich. Das ist zugleich die Änderung der potentiellen Energie des Körpers.

$$\Delta E_{\text{pot}} = W_h = m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

**Änderung der potentiellen Energie des Körpers**

#### Kinetische Energie $E_{\text{kin}}$ und Beschleunigungsarbeit $W_a$

Wird ein Körper, z.B. ein Auto, aus dem Stillstand auf die Geschwindigkeit  $v$  gebracht, dann ist dazu nach dem dynamischen Grundgesetz die resultierende Kraft  $F_{\text{res}} = ma$  erforderlich.  $F_{\text{res}}$  wirkt dabei in Bewegungsrichtung auf dem Weg  $s$ , verrichtet also am Körper eine Arbeit, die wir Beschleunigungsarbeit  $W_a = F_{\text{res}} \cdot s$  nennen.

Wird ein Körper aus dem Stillstand auf die Geschwindigkeit  $v$  gebracht, dann ist dazu die **Beschleunigungsarbeit  $W_a$**  erforderlich. Damit besitzt er eine **kinetische Energie** (Bewegungsenergie)  $E_{\text{kin}}$  von genau dem gleichen Betrag.

$$E_{\text{kin}} = W_a = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$E_{\text{kin}}$ : kinetische Energie in J  
 $W_a$ : Beschleunigungsarbeit in J  
 $m$ : Masse in kg  
 $v$ : Geschwindigkeit in m/s

Das ist die Energie oder Arbeitsfähigkeit, mit der der Körper nun an einem anderen Körper Arbeit verrichten kann. Da nur solche Körper diese Energieart besitzen, die sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegen, spricht man von Bewegungsenergie oder kinetischer Energie  $E_{\text{kin}}$ .

Besitzt ein Körper schon die Geschwindigkeit  $v_1$  und wird durch  $F_{\text{res}}$  auf dem Wegabschnitt  $s$  auf die Geschwindigkeit  $v_2$  beschleunigt, dann haben wir für  $s$  nicht  $v \cdot \Delta t / 2$  einzusetzen (wie oben), sondern  $(v_2^2 - v_1^2) / (2 \cdot a)$ .

$$\Delta E_{\text{kin}} = W_a = \frac{m}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

**Änderung der kinetischen Energie des Körpers**

Damit erhalten wir eine Gleichung für die Beschleunigungsarbeit  $W_a$  in der allgemeinen Form.  $W_a$  gibt dann zugleich die Änderung der kinetischen Energie des Körpers an.



### Spannungsenergie $E_s$ und Formänderungsarbeit $W_f$

Spannen wir eine vorher unverformte Feder, dann ist dazu die **Formänderungsarbeit** oder **Federarbeit  $W_f$**  erforderlich. Dabei ändert sich seine **Spannungsenergie  $E_s$**  genau um diesen Betrag.

$$E_s = W_f = \frac{F \cdot s}{2} = \frac{c}{2} \cdot s^2$$

$E_s$ : Spannungsenergie in J  
 $W_f$ : Federarbeit in J  
 $F$ : Kraft in N  
 $s$ : Federweg in m  
 $c$ : Federrate in N/m

Das ist die Energie oder Arbeitsfähigkeit, mit der die gespannte Feder nun an einem anderen Körper Arbeit verrichten kann. Diese Energie nennen wir Spannungsenergie  $E_s$ .

Besitzt die Feder schon die Spannungsenergie  $E_{s1}$  (weil sie vorgespannt worden ist,) dann ist zum weiteren Spannen die Federarbeit  $W_f$  erforderlich.

$$\Delta E_s = W_f = \frac{F_1 + F_2}{2} \cdot s = \frac{c}{2} \cdot (s_2^2 - s_1^2)$$

Diese Federarbeit  $W_f$  ist zugleich die Änderung der Spannungsenergie in der Feder.

**Änderung der Spannungsenergie**

### Elektrische Energie $E_{el}$

Treibt die Spannung  $U$  den Strom  $I$  während der Zeit  $t$  durch einen Verbraucher, so wird **die elektrische Energie  $E_{el}$**  verbraucht.

$$E_{el} = U \cdot I \cdot t$$

$E_{el}$ : elektrische Energie in J  
 $U$ : Spannung in V (Volt)  
 $I$ : Strom in A (Ampere)  
 $t$ : Zeit in s

### Wärmeenergie $Q$

Ändert ein Stoff der Masse  $m$  mit der spezifischen Wärmekapazität  $c$  seine Temperatur um  $\Delta T$  ohne Änderung des Aggregatzustandes, so ändert sich die in ihm enthaltene **Wärmeenergie** um  $Q$ .

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

$Q$ : Wärmeenergie (ohne Aggregatzustandsänderung) in J  
 $m$ : Masse in kg  
 $c$ : spezifische Wärmekapazität in J/(kg·K)  
 $\Delta T$ : Temperaturdifferenz (ohne Aggregatzustandsänderung) in K

## 3.4 Aufgaben zur Energieberechnung

### Aufgabe 6:

Wie viel Energie ist 1 kWh?

Für folgende Anwendungen sollen die Werte zuerst geschätzt und dann berechnet werden. Überprüfe dann deine Schätzungen und diskutiere sie.

- Wie lange kann eine 15W-Energiesparlampe betrieben werden?
- Wie hoch läßt sich damit eine Tonne heben?
- Wie viel Liter Wasser können damit von 4°C zum Sieden gebracht werden? ( $c_{\text{Wasser}} = 4187 \text{ J/(kgK)}$ )
- Wie hoch ist die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges mit der Masse von 1100 kg?



**Aufgabe 7:**

Berechne die Arbeit, die du verrichtest, wenn du 5 Paletten Mauerblöcke (36 Blöcke/Palette) 9 m zum Obergeschoss transportierst. Jeder Mauerblock wiegt 25 kg.

- Welche potentielle Energie besitzen dann diese Blöcke?
- Wieviel kg Nutella benötigst du zum Frühstück, wenn du annimmst, daß der Verbrennungswirkungsgrad 90% beträgt, und daß du zusätzlich zu den Mauerblöcken auch deine eigene Masse (80 kg) 180 mal nach oben geschleppt hast?
- Wieviel Tonnen Öleinheiten entspricht das?
- Was hast du "geleistet", wenn die Arbeit in 2 Stunden verrichtet ist?
- Wieviel würde dir die ENOVOS zahlen, wenn du statt Blöcke zu schleppen, einen Generator ( $\eta = 95\%$ ) angetrieben hättest (1kWh  $\equiv$  0,0992€)?

**Aufgabe 8:**

Berechne die kinetische Energie eines PKW von 1200 kg bei 50 km/h und bei 70 km/h. Auf welche Höhe läßt sich das Auto mit dieser Energie jeweils heben?

Der freie Fall des Wagens aus den berechneten Höhen entspricht der Energie die auftritt, wenn der Wagen bei diesen Geschwindigkeiten gegen eine Mauer fährt!!

**Aufgabe 9:**

Jemand läßt zweimal täglich beim Zähneputzen unnötigerweise das Warmwasser länger laufen als nötig, was einen zusätzlichen Warmwasserbedarf von 2 Litern pro Tag ergibt. Das Wasser wird elektrisch von 10 °C auf 40 °C aufgeheizt.

- Wie viele kWh Energie müssen für diese Unachtsamkeit im Laufe des Jahres aufgebracht werden?
- Welche Kosten verursacht dies (1 kWh  $\equiv$  0,16 €)?
- Wie viele kg Steinkohle müssen dafür im Kraftwerk verheizt werden ( $\eta = 30\%$ )?
- Wie lange könnte sich jemand mit der täglich verschwendeten Energiemenge rasieren, wenn der Rasierapparat 15 W benötigt?
- Wie lange kann man damit den Computer betreiben?

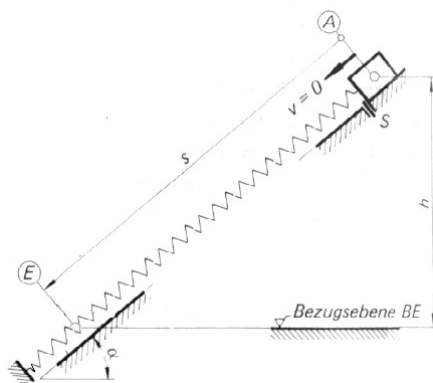
**3.5 Energieerhaltungssatz für technische Vorgänge**

Abb.9: Anfangszustand

Ein Körper der Masse  $m$ , zunächst durch die Sperre  $S$  in Ruhe gehalten (Abb.9), wird nach seiner Freigabe durch eine Zugfeder die schiefe Ebene abwärts gezogen.

Er durchläuft den Weg  $s$  vom Anfangspunkt  $A$  des Vorganges zum Endpunkt  $E$ , wo die Feder gerade entspannt (Abb.10) ist, also noch nicht zusammengedrückt wird.

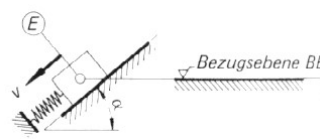


Abb.10: Endzustand

In  $A$  besitzt der Körper die Anfangsenergie  $E_A = E_{\text{pot}}$  gegenüber der um  $h$  tiefer liegenden Bezugsebene  $BE$ .

Am Ende des Vorganges ist  $E_{\text{pot}} = 0$  geworden; dafür besitzt der Körper die Endenergie  $E_E = E_{\text{kin}}$ .

Nach dem Energieerhaltungssatz müssten die beiden Energiebeträge gleich groß sein ( $E_E = E_A$ ). Das kann hier nicht sein, weil der Körper auf dem Wege  $s$  sowohl Energie aufgenommen als auch abgegeben hat, und zwar in Form von mechanischer Arbeit:

**Aufgenommen** hat der Körper Energie in Form der zugeführten Federarbeit  $W_{zu} = W_f = c \cdot s^2/2$ .

**Abgegeben** hat der Körper Energie in Form der abgeführten Reibarbeit  $W_{ab} = W_R = F_R \cdot s$ .

Die Energieumwandlung durch Zu- und Abfuhr mechanischer Arbeit können wir in ein Schema als Energiebilanz (Abb.11) eintragen.

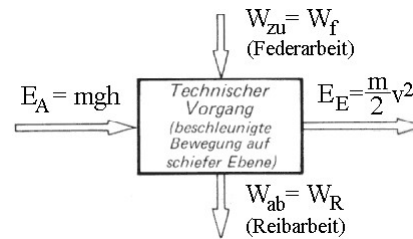


Abb.11: Schema der Energiebilanz

Das Aufstellen der Energiebilanz führt zu:

$$E_E = E_A + W_{zu} - W_{ab}$$

**Beachte:**

Die Arbeit der Abtriebskomponente der Gewichtskraft  $G \cdot \sin \alpha$  ist nicht zu berücksichtigen:

Sie wurde vorher beim Heben um die Höhe  $h$  als potentielle Energie  $E_{pot}$  aufgenommen.

Allgemein kann man den Energieerhaltungssatz für technische Vorgänge aufstellen, so wie wir ihn künftig beim Lösen von Aufgaben anwenden wollen.

**Energieerhaltungssatz für technische Vorgänge:**

Die Energie  $E_E$ , am Ende eines Vorgangs ist gleich der Energie  $E_A$  am Anfang des Vorgangs, vermehrt um die während des Vorgangs zugeführte Arbeit  $W_{zu}$  bzw. Wärme  $Q_{zu}$  und vermindert um die während des Vorgangs abgeführte Arbeit  $W_{ab}$  bzw.  $Q_{ab}$

$$E_E = E_A + W_{zu} - W_{ab} + Q_{zu} - Q_{ab}$$

- $E_E$ : Energie am Ende des Vorgangs
- $E_A$ : Energie am Anfang des Vorgangs
- $W_{zu}$ : zugeführte Arbeit
- $W_{ab}$ : abgeführte Arbeit
- $Q_{zu}$ : zugeführte Wärme
- $Q_{ab}$ : abgeführte Wärme

Bei der Energieumwandlung in Maschinen treten Energieverluste hauptsächlich dadurch auf, daß sich ein Teil der Energie über die Reibarbeit in Wärmeenergie umwandelt.

### 3.6 Aufgaben zum Energieerhaltungssatz

**Aufgabe 10:**

Ein Waggon von der Masse 40 000 kg rollt aus der Geschwindigkeit 1,8 m/s auf horizontaler Bahn aus. Dabei wirkt ein Fahrwiderstand  $F_w = 280$  N.

Wie lang ist der Ausrollweg  $s$ ?

**Lösung 10:**

Am Ende des Vorganges ruht der Körper auf der Bezugsebene, das heißt, seine Endenergie  $E_E$  ist Null.

Am Anfang des Vorganges besitzt er die kinetische Energie  $E_A$ . Zwischen Anfang und Ende des Vorganges wird die Arbeit des Fahrwiderstandes  $W_{ab}$  abgeführt.

$$E_E = E_A - W_{ab}$$

$$0 = \frac{m}{2} \cdot v^2 - F_w \cdot s$$

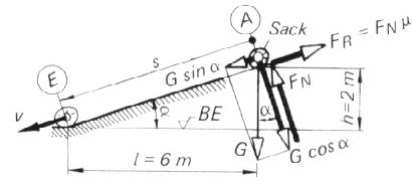
$$s = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot F_w} \quad s = s(m, v, F_w)$$

$$s = \frac{40000 \text{ kg} \cdot 1,8^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2 \cdot 280 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}} = 231,4 \text{ m}$$

**Aufgabe 11:**

Die Skizze (Abb.12) zeigt das Schema einer Sackrutsche. Die Reibzahl zwischen Sack und Rutsche soll  $\mu = 0,3$  betragen. Gesucht ist die Endgeschwindigkeit  $v$  des Sackes am Ende der schiefen Ebene.

Abb.12: Sackrutsche

**Lösung 11:**

Wir gehen wieder vom Energieerhaltungssatz aus: Die Energie am Ende des Vorganges kann nur kinetische Energie sein, denn der Körper besitzt dort die Geschwindigkeit  $v$  und der Höhenunterschied zur Bezugsebene BE ist null geworden ( $E_{\text{pot}} = 0$ ).

Am Anfang besaß der Körper nur potentielle Energie, denn er ruhte in der Höhe  $h$ . Abgeführt wird nur die Reibarbeit  $W_R$ . Für die Reibkraft setzen wir  $F_R = \mu \cdot F_N$  und für die Normalkraft  $F_N = m \cdot g \cdot \cos \alpha$  ein.

Da der Weg  $s$  nicht gegeben ist, setzen wir  $s = l / \cos \alpha$  ein ( $l$  ist gegeben). Dadurch kürzt sich auch  $\cos \alpha$  heraus und wir finden die einfachste Gleichung für die Endgeschwindigkeit  $v = v(g, h, l)$ .

**Aufgabe 12:**

Für einige Brennstoffe sind in der nachfolgenden Tabelle (Abb.13) die Heizwerte angegeben d.h. die Energiemengen, die je Einheit beim Verbrennen freigesetzt werden. Da es sich um Durchschnittswerte handelt, können je nach Beschaffenheit des Brennstoffes Abweichungen auftreten.

Brennstoff	Einheit / Dichte	Heizwert in MJ	Heizwert in kWh	SKE-Faktor	Masse/E. in g/kWh	Preis in €/Einheit	Kosten/E. in €/kWh
Steinkohle	1 kg	29,7					
Steinkohle-brikett	1 kg	31,4					
Braunkohle	1 kg	8,5					
Braunkohle-brikett	1 kg	19,5					
Diesel / leichtes Heizöl	1 l 0,83 kg/l	35,4					
Benzin	1 l 0,74 kg/l	32,2					
Holz (Buche)	1 kg	14,7					
Holzpellets							
Erdgas	1 m <sup>3</sup>	31,7					
Wasserstoff	1 m <sup>3</sup>	10,8					
Propan	1 m <sup>3</sup>	43,3					

Abb.13: Kennwerte von Brennstoffen

Vervollständige die Tabelle mit folgenden Werten:

- Erforderliche Masse, um 1 kWh Energie zu erhalten (E.=Energie)
- Aktuelle Preise der Brennstoffe
- Energiekosten je Energieeinheit kWh

**Aufgabe 13:**

Ein Körper der Masse  $m = 10 \text{ kg}$  hängt mit einem Seil über einer Rolle an einer Feder (Abb.14). Die Federrate beträgt  $2 \text{ N/mm}$ . Die Feder ist entspannt, der Körper wird festgehalten.

- Wie groß ist der größte Federweg der sich einstellt, wenn der Körper aus der beschriebenen Lage frei fallen kann? (Energieerhaltungssatz!)
- Wie groß ist der größte Federweg bzw. Fallweg, der sich einstellt, wenn der Körper langsam abgesenkt wird? (Körper freischneiden und dann das Kräftegleichgewicht ansetzen.)

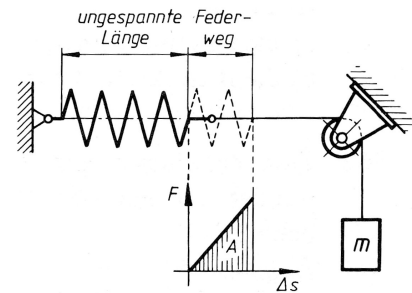


Abb.14: Masse an Feder

**Aufgabe 14:**

Auf der skizzierten Ebene (Abb.15) mit Auslauf wird ein Körper aus der Ruhelage losgelassen, gleitet die schiefe Ebene abwärts, dann die waagerechte Strecke weiter und wird durch eine Feder bis zum Stillstand gebremst. Dabei spannt er die Feder mit der Federrate  $c$  um den Federweg  $\Delta s$ . Auf allen Gleitflächen wirkt die Reibung mit der Reibzahl  $\mu$ .

Stelle den Energieerhaltungssatz für den Vorgang zwischen den beiden Ruhelagen auf und entwickle daraus eine Gleichung für den Anlaufweg  $s_1 = s_1(m, s_2, \Delta s, \mu, c, \alpha)$ .

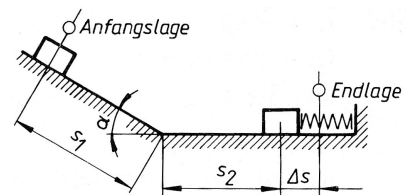


Abb.15: Körper mit Ebene und Feder

**Aufgabe 15:**

Das Pendelschlagwerk (Abb.16) wird in der skizzierten Stellung ausgelöst und zerschlägt die Werkstoffprobe, die am tiefsten Punkt der Kreisbahn an Widerlagern aufliegt. Die Schlagarbeit mindert die kinetische Energie des Pendelhammers, so daß er nur bis zur Höhe  $h_2$  steigt. Die Pendelmasse beträgt  $8,2 \text{ kg}$  bei Vernachlässigung der Stange. Die Abmessungen betragen  $l = 655 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 151^\circ$ ,  $\beta = 48,5^\circ$ .

- Wie groß sind die Fallhöhe  $h_1$  und die Steighöhe  $h_2$ ?
- Wie groß ist das Arbeitsvermögen des Hammers in der skizzierten Ausgangsstellung, bezogen auf die Lage der Werkstoffprobe?
- Wie groß ist die von der Probe aufgenommene Schlagarbeit?

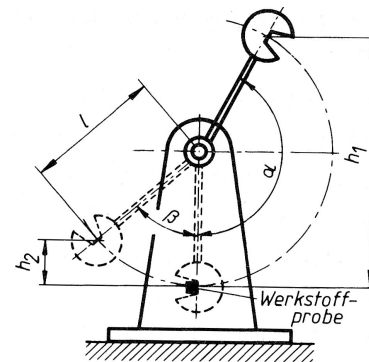


Abb.16: Pendelschlagwerk

## B Entwicklung des Energieverbrauchs

Die Energieversorgungssysteme, die wir heute zur Verfügung haben, sind historisch gewachsen. Immer, wenn die Menschen neue Energieträger nutzbar machen konnten, waren damit große Umwälzungen verbunden. Die zunehmende Beherrschung und Ausbeutung der in der Natur vorkommenden Energieträger erleichterten den Menschen das Leben ganz erheblich. Es darf allerdings nicht übersehen werden, dass von dem heutigen, übermäßigen Energieverbrauch der Menschheit Gefahren für eben diese Menschheit ausgehen. Gerade deshalb muss mit Energie in Zukunft viel sparsamer und sorgsamer umgegangen werden.

### 1 Von der Muskelkraft zum Kernkraftwerk

#### Anfänglicher Energieverbrauch

Am Anfang der Menschheitsgeschichte war der Mensch allein auf seine **Körperkräfte** angewiesen. Alle Tätigkeiten wurden mit eigener Muskelkraft vollzogen. Die Lebenserwartung war kurz. Für einen Teil der schweren körperlichen Arbeit konnte später die überlegene Muskelkraft von **Tieren** genutzt werden, was bis auf den heutigen Tag praktiziert wird.

Der Gebrauch des **Feuers**, das Wärme und Licht spendet, war für die menschliche Entwicklung ein Meilenstein. Die Menschen wurden unabhängiger von Klima und Witterung, konnten aufgrund der Speis Zubereitung auf ein breiteres Nahrungsangebot zurückgreifen und schließlich Gebrauchsgegenstände aus **Metall** und **Keramik** herstellen. Die Lebens- und Überlebensbedingungen hatten sich damit wesentlich gebessert, so daß die Bevölkerungszahl anstieg. Das Feuer ist noch immer der weitaus bedeutendste „Energiespender“ der Menschheit. Während vor der Industrialisierung **Holz** der wichtigste Brennstoff war, sind es seitdem die fossilen Energieträger **Kohle**, **Öl** und **Gas** geworden. Da bei der Verbrennung Schadstoffe freigesetzt werden, sind mit dieser Art der Energienutzung große **Umweltprobleme** verbunden.

Allerdings war man mit der Beherrschung des Feuers noch lange nicht in der Lage, die Wärmeenergie aus der Verbrennung in **mechanische Antriebsenergie** umzuwandeln. Um mechanische Energie zu gewinnen, nutzte man mit entsprechenden technischen Vorrichtungen die **Wind-** und **Wasserkraft** aus. Mit deren Hilfe wurden **Mühlen** und **Bewässerungsanlagen** betrieben. Später wurden die Wind- und vor allem die Wasserkraft zum Antrieb von **Maschinen** genutzt. Mensch und Tier wurden damit teilweise von körperlicher Arbeit entlastet. Diese emissionsfreien<sup>1)</sup>, regenerativen Energieträger Wind und Wasser sind heute wieder aktuell, weil sie sehr umweltverträglich sind.

#### Die 1. industrielle Revolution

Mit der Erfindung der **Dampfmaschine** (Abb.1) im Jahre 1769 baute der englische Ingenieur James WATT<sup>2)</sup> eine die Welt verändernde technische Maschine.

Die Dampfmaschine war „die“ **Energiewandler** schlechthin, der thermische Energie des Dampfes in mechanische Energie umwandeln konnte. Das damit in beliebigen Mengen zur Verfügung stehende, von Wind und Wasser unabhängige Angebot an mechanischer Antriebsenergie brachte enorme Umwälzungen in allen Lebensbereichen mit sich.

Diese Umwälzungen (unter anderen enormen Verbesserungen von Produktionsmethoden) waren so tiefgehend, daß man von der **1. industriellen Revolution** (ca. 1760 bis 1830) spricht.

Abb.1: Die Dampfmaschine



<sup>1)</sup> Emission = das Aussenden oder Abgeben von umweltbelastenden Stoffen an die Umgebung, insbesondere das Abgeben von Luftschadstoffen (siehe Kapitel III.E Energie und Umwelt)

<sup>2)</sup> James WATT (1736 - 1819), schottischer Erfinder und Industrie-ingenieur, verbesserte die Dampfmaschine entscheidend (zahlreiche Patente) und wird daher meist als deren Erfinder bezeichnet.



## Primärenergien, technische Entwicklung und Folgen

Die **Kohle** wurde zum wichtigsten Primärenergieträger. Dort, wo große Kohlevorkommen ausgebeutet werden konnten, bildeten sich **Industriezentren** mit hoher **Bevölkerungsdichte**. Damit waren **große soziale Umwälzungen** und Spannungen verbunden, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. Es entstanden aber auch **Umweltschäden** durch die massive Verfeuerung der Kohle.

Schließlich wurde mit der Dampfmaschine auch das **Transportwesen** völlig verändert. Die Eisenbahn wurde das Transportmittel der einsetzenden Industrialisierung.

In dieser Zeit wurden auch die theoretischen Grundlagen der Dampfmaschine, die **Thermodynamik**, intensiv erforscht. Der Engländer William THOMSON<sup>1)</sup> führte den Energiebegriff im heutigen Sinne ein.

Die Erfindung der **Verbrennungsmotoren** (Ottomotor im Jahr 1867, Dieselmotor im Jahr 1892) brachte weitere Energiewandler, welche mechanische Antriebsenergie verfügbar machten. Diese Motoren waren besonders für den mobilen Einsatz geeignet.

Parallel dazu wurde die Nutzung der fossilen Energieträger **Erdöl** und **Erdgas** erschlossen und intensiviert. Otto- und Dieselmotoren haben die Verkehrssysteme nachhaltig verändert. Den **Annehmlichkeiten** des **Individualverkehrs** für den Einzelnen, der mit diesen Motoren möglich wurde, stehen die **Belastungen** gegenüber, die der **Massenverkehr** für Mensch und Umwelt zur Folge hat.

## Die elektrische Energie

Die großtechnische Erzeugung, Verbreitung und auch Nutzung **elektrischer Energie** begann ebenfalls etwa mit dem Beginn des 20. Jahrhunderts. Nach der Erfindung des elektrischen Generators durch Werner VON SIEMENS<sup>2)</sup> wurde ein immer dichteres elektrisches **Versorgungsnetz** in Deutschland aufgebaut, das sich inzwischen zu einem **europäischen Verbundnetz** mit sehr hoher Versorgungssicherheit für die Verbraucher entwickelt hat. Die in das Netz eingespeiste Energie wurde zunächst überwiegend mit **Kohlekraftwerken** und zum kleineren Teil mit **Wasserkraft** erzeugt.

Ab den 60er Jahren kamen dann zur Stromerzeugung auch Atomkraftwerke hinzu, die zwischenzeitlich einen erheblichen Anteil an der Stromerzeugung haben. Die Vorteile der elektrischen Energie haben zur Folge, dass inzwischen alle entwickelten Länder Elektrizitätsversorgungssysteme aufgebaut haben. Besonders die gute **Verteilbarkeit** der elektrischen Energie und ihre uneingeschränkte **Umwandelbarkeit** in andere Energieformen mit hohen Wirkungsgraden machen sie so interessant. Die Elektrizität dient aber nicht nur der Energieversorgung; sie ist zudem der wichtigste **Informationsträger** in der modernen Welt der Telekommunikation.

Mit Erdgas betriebene Gasturbinenanlagen und sowie Erdölkraftwerke liefern seit Mitte der 70er Jahre einen weiteren Teil der täglich weltweit verbrauchten elektrischen Energie.

## Die Zukunft...

Die Sonne ist nicht nur die älteste Energiequelle unseres Planeten, sie ist auch der Ursprung aller anderen Primärenergien. Natürlich nutzte der Mensch - wie alle Lebewesen auf der Erde - von Anfang an die **Sonnenenergie**. Aus vielen Gründen muss die Menschheit zukünftig die Sonne verstärkt als Energiequelle nutzen:

- Es bestehen nur begrenzte Vorräte an fossilen Energieträgern.
- Bei den Atomkraftwerken gibt es Gefahren und es fehlen Endlagerlösungen.
- Fossile Energieträger und Kernenergie bringen Umweltprobleme (Luft- und Wasserverschmutzung, radioaktive Strahlung, Treibhauseffekt, Saurer Regen) mit sich.

Dabei geht es nicht nur um eine **passive Nutzung** der Sonnenenergie, wie dies in den letzten Jahrhunderten vorwiegend der Fall war. In der Zukunft wird eine **aktive Nutzung** unumgänglich, bei der die Sonnenstrahlen mit technischen Mitteln in andere End- oder Nutzenergien umgewandelt werden.

<sup>1)</sup> William THOMSON (1824 – 1907), ab 1892 1st Baron Kelvin of Largs, irischer Physiker (Elektrizitätslehre, Thermodynamik) und Ingenieur, 1856 bis 1899 Professor in Glasgow, Einheit der absoluten Temperatur nach ihm benannt.

<sup>2)</sup> Werner VON SIEMENS (1816 - 1892), deutscher Erfinder, Begründer der Elektrotechnik und Industrieller. Begründer der Galvanotechnik. 1857 Ozonröhre zur Trinkwasserreinigung.



1)

2)





## 2 Weltweiter Energieverbrauch

In Abb.2 ist die zeitliche Entwicklung des Primärenergieverbrauchs der Welt, aufgeschlüsselt nach verschiedenen Primärenergieträgern, dargestellt. Der vor dieser Zeit liegende Energieverbrauch ist kaum dokumentiert; er dürfte auf niedrigem Niveau weitgehend konstant gewesen sein.

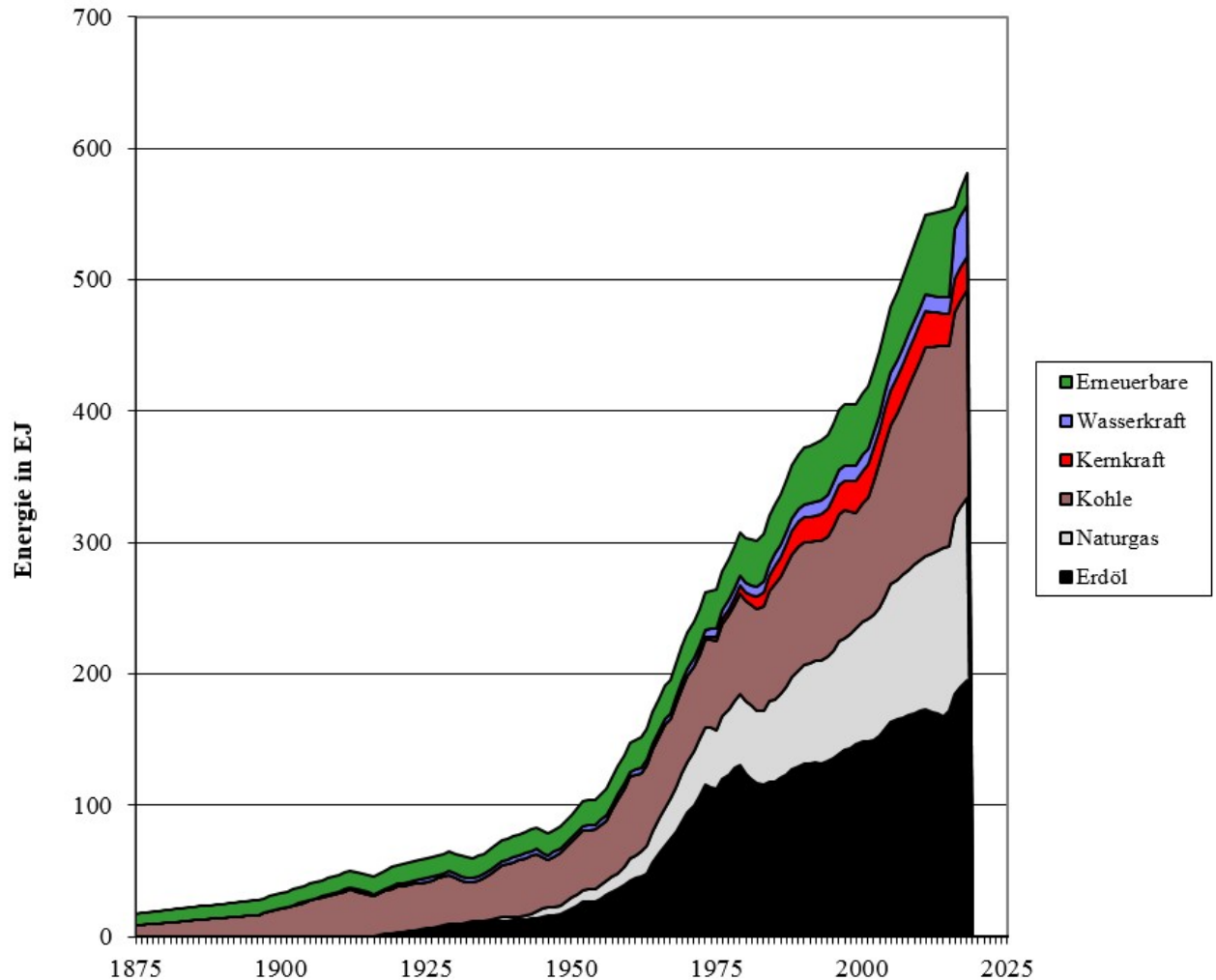


Abb.2: Primärenergieverbrauch der Welt

Aus Abb.2 erkennt man, daß der weltweite Energieverbrauch mit der einsetzenden Industrialisierung ansteigt.

### Aufgabe 1:

Ab 1929 bis Anfang/Mitte der 30er Jahre gab es eine Weltwirtschaftskrise.

1973 und 1979/80 gab es weltweit eine Erdölkrise, bedingt durch stark ansteigende Erdölpreise.

a) Wann fand der 1. Weltkrieg statt?

b) Betrachte die 4 Zeiträume in Abb.2 und kommentiere den jeweiligen Energieverbrauch

Ein starker Anstieg des Energieverbrauchs ist nach dem Zweiten Weltkrieg zu verzeichnen, er verdoppelte sich in den Nachkriegsjahren innerhalb von 14 Jahren.

Eine geradezu explosionsartige **Zunahme** fand seit 1990 statt. Von 1995 bis 2005 beispielsweise betrug der Anstieg über 22 Prozent, entsprechend 88 EJ, was soviel ist wie der gesamte Weltenergieverbrauch im Jahre 1949! Dieser rasante Zuwachs wurde hauptsächlich durch die Entwicklungs- und Schwellenländer verursacht.

Zur Erinnerung:	1 ZJ = $10^{21}$ J	1 EJ = $10^{18}$ J
	1 PJ = $10^{15}$ J	1 TJ = $10^{12}$ J
	1 GJ = $10^9$ J	1 MJ = $10^6$ J



Weiter ist ersichtlich (siehe auch Abb.3), dass bisher die Zunahme des Weltenergieverbrauchs größtenteils durch **fossile Energieträger** gedeckt wurde. Ein Weg, der in Zukunft nicht mehr in dem Maße beschritten werden kann.

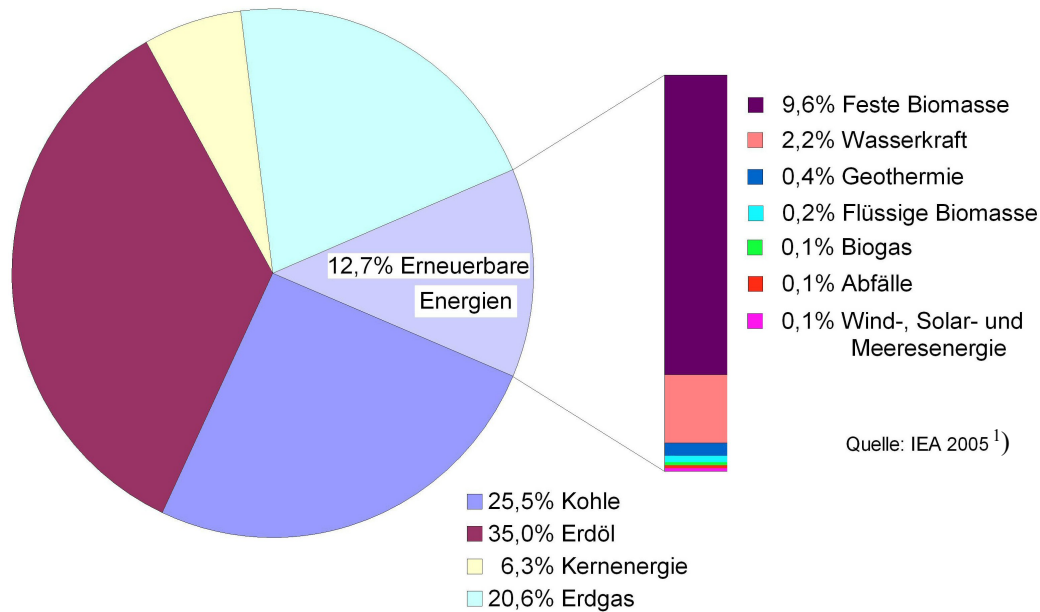


Abb.3: Weltweiter Primärenergieverbrauch 2005

Im Jahr 2005 wurden 12,7% des Energieverbrauchs durch erneuerbare Energien abgedeckt. Dabei stellt feste Biomasse 9,6% des Weltverbrauches dar, dies entspricht größtenteils Brennstoffen, die in Entwicklungs- und Schwellenländern zum Kochen und Heizen verwendet werden. Wasserkraft (2,2%), Geothermie, Biogas, Wind-, Solar- und Meeresenergie stellen zusammen also nur 3,1% des weltweiten Primärenergieverbrauchs dar.

Um die zunehmende weltweite Nachfrage nach Energie befriedigen zu können, ist eine verstärkte Nutzung **regenerativer Energiequellen** unabdingbar. Nur auf diese Weise kann eine umweltverträglichere Energienutzung gelingen.

Es ist aus zwei Gründen zu erwarten, daß der **weltweite Energiebedarf** auch in Zukunft **weiter steigen** wird:

- Wir haben einen ungebremsten **Anstieg** der **Weltbevölkerung** (Abb.4). Dadurch brauchen immer mehr Menschen Energie.

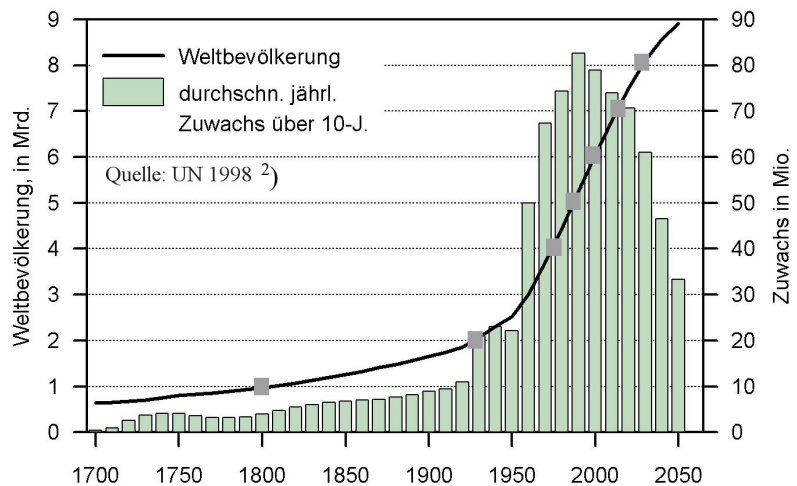


Abb.4: Weltbevölkerung

<sup>1)</sup> IEA: International Energy Association  
<sup>2)</sup> UN: United Nations

## 2. Der Pro-Kopf-Energieverbrauch steigt.

In Abb.5 ist der Pro-Kopf-Energieverbrauch einiger Länder/Weltregionen im Jahr 2001 dargestellt.

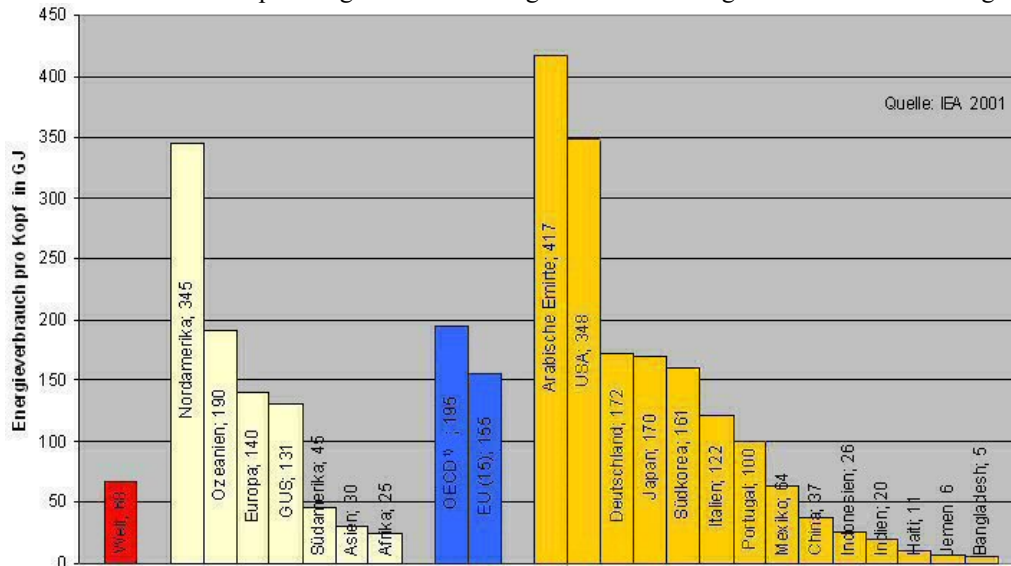


Abb.5: Pro-Kopf-Energieverbrauch 2001

Es ist leicht ersichtlich, dass der Energieverbrauch der Menschen im Jemen oder in Bangladesch unter 10% des weltweiten Durchschnitts liegt. Dem gegenüber verbraucht ein Amerikaner oder ein Europäer ein Mehrfaches des Weltdurchschnitts.

Im Zeitraum von 2001 bis 2014 (Abb.6) ist der weltweite Durchschnittswert bereits von 68 GJ auf 85 GJ angestiegen.

Unter anderem ergibt sich dieser Anstieg durch China, wo der Pro-Kopf-Energieverbrauch in diesem Zeitraum von 37 GJ auf 94 GJ anwuchs.

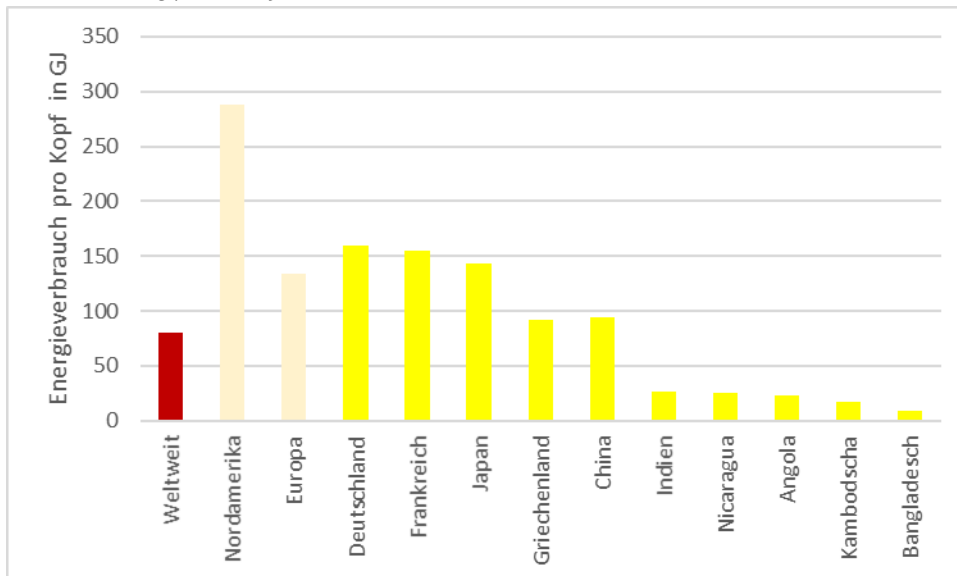


Abb.6: Pro-Kopf-Energieverbrauch 2014 (Quelle: lowtechmagazine.com)

Weltweit betrachtet kann man sagen, dass sich in den **Industrieländern** teilweise eine Stagnation des Pro-Kopf-Energieverbrauchs abzeichnet, allerdings auf einem hohen Niveau.

In den **Entwicklungs- und Schwellenländern** hingegen gibt es große Steigerungsraten. Diese ergeben sich aus dem teilweise rapide ansteigenden Energiebedarf dieser Länder, bedingt durch beginnende bzw. rasch voranschreitende Industrialisierung sowie durch sich verändernde Lebensbedingungen und -gewohnheiten der Menschen.

<sup>1)</sup> OECD: "Organisation for Economic Cooperation and Development" Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, vertreten durch folgende Länder: Australien, alle EU15-Staaten, Island, Japan, Kanada, Neuseeland, Norwegen, Polen, Schweiz, Slowakei, Süd-Korea, Tschechien, Türkei, Ungarn, Vereinigte Staaten von Amerika und Kommission der EU.

### 3 Energieverbrauch verschiedener Länder

#### 3.1 Primärenergieverbrauch

Der Energieverbrauch ist in allen Ländern unterschiedlich groß (Abb.7), da sich einerseits die **Bevölkerungszahlen** unterscheiden, andererseits der **Pro-Kopf-Energieverbrauch** sehr stark schwankt.

Das Diagramm zeigt wie groß der Primärenergiebedarf einiger Länder/Weltregionen ist. Des Weiteren ist teilweise ein starker Anstieg des Verbrauchs deutlich sichtbar.

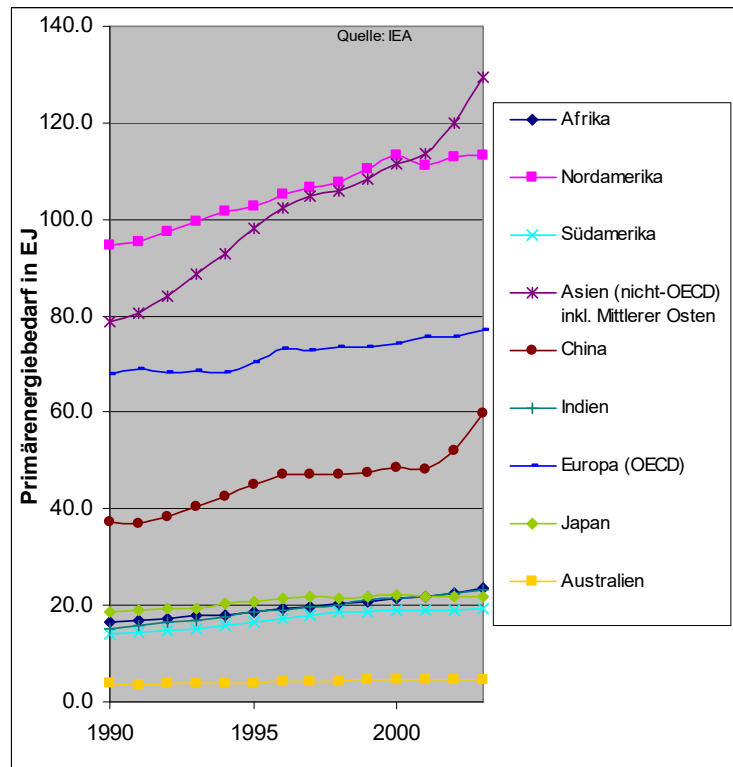


Abb.7: Energieverbrauch

Die EU ist einer der größten Energieverbraucher weltweit. Mit 70,17 EJ (1676 Mtep) waren das im Jahr 2002 16,38 % des Weltenergieverbrauchs.

#### 3.2 Energieverbrauch einer Familie

Am Beispiel von Deutschland -stellvertretend für viele mitteleuropäische Länder- soll der Energieverbrauch in einem Haushalt dargestellt werden.

Abb.8 zeigt den durchschnittlichen Energieverbrauch einer vierköpfigen, deutschen Familie.

Dabei wurde ein familieneigenes Kraftfahrzeug in der Bilanz berücksichtigt.

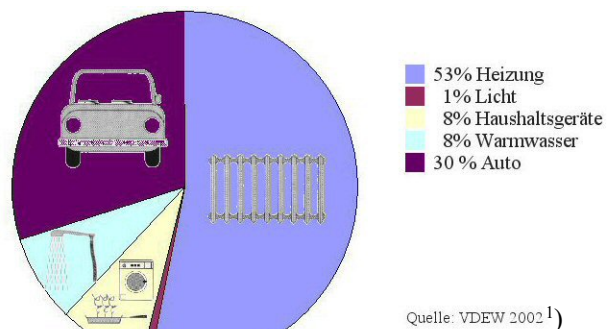


Abb.8: Energieverbrauch Haushalt

In dem Diagramm erkennt man, dass die Raumheizung und das Auto die bei weitem größten Anteile am Energieverbrauch des Haushaltes haben. Bei diesen lassen sich demnach auch am ehesten nennenswerte Einsparungen erzielen.

Bei der Raumheizung sind ohne großen Aufwand Einsparungen durch eine gute Isolierung des Hausdaches und der Außenwände, moderne gesteuerte Heiztechnik und moderate Raumtemperaturen zu erzielen.

Beim Auto sind es in erster Linie der Verzicht auf unnötige Fahrten und das Umsteigen auf öffentliche Verkehrsmittel, die zu hohen Energieeinsparungen führen können.

<sup>1)</sup> VDEW: Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.

**Aufgabe 2:**

Laut Energieagentur Nordrheinwestfalen betrug der mittlere Energieverbrauch eines Haushaltes (ohne Berücksichtigung von Autos) 95,4 GJ.

- Berechne den jährlichen Energieverbrauch eines PKW, der im Schnitt 7 l Kraftstoff verbraucht und 15000 km fährt.
- Wie hoch wäre der Gesamtenergieverbrauch des Haushaltes unter Berücksichtigung des Autos?
- Wie groß wäre der Anteil des Autos am Energieverbrauch?
- Berechne die Punkte b) und c) je zweimal unter den Annahmen, dass die Familie zwei bzw. 3 Autos fährt.

## 4 Energieverbrauch in Luxemburg

### 4.1 Energieverbrauch nach Verbrauchergruppen

Nachfolgende Abb.9 stellt die zeitliche Entwicklung des Endenergie-Verbrauchs des Landes seit 1960 dar.

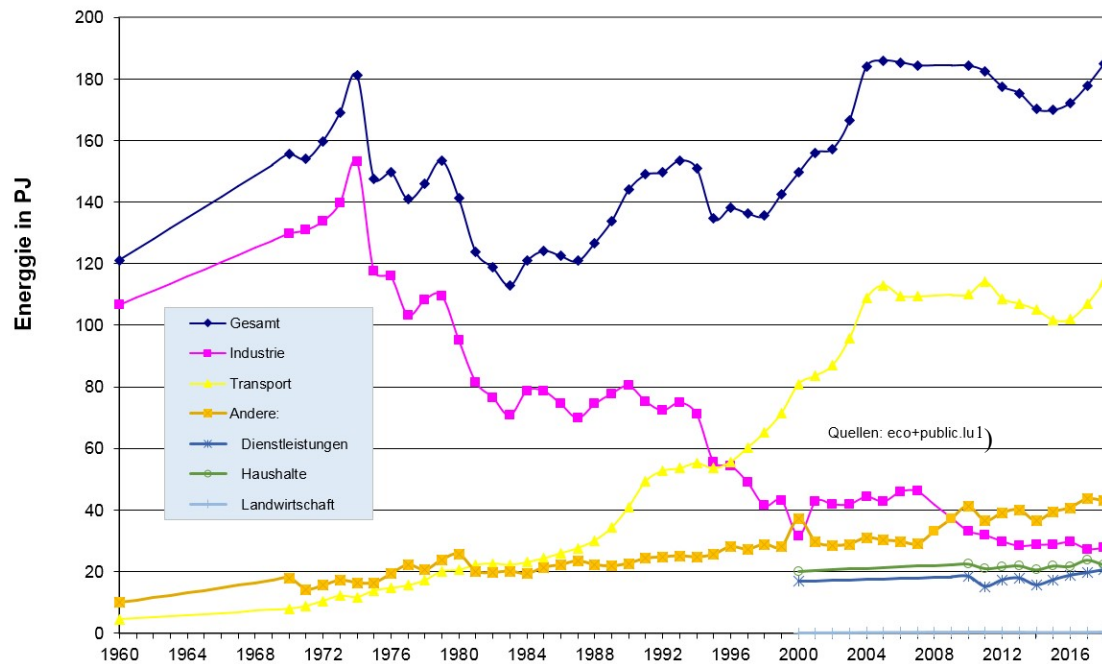


Abb.9: Endenergie-Verbrauch in Luxemburg nach Verbrauchergruppe

Unter die Kategorie „Andere“ fallen **Haushalte, Handel, Handwerk** und **Landwirtschaft**. Erst seit 2000 wird die Kategorie unterteilt in die Bereiche **Dienstleistungen, Haushalte** und **Landwirtschaft**. Man erkennt im Diagramm, dass der Gesamtenergieverbrauch seit 1960 zunächst anstieg, insbesondere durch einen starken Anstieg im Bereich Industrie.

Ab Mitte der Siebziger (1974) sank der Verbrauch dann während ca. 10 Jahren.

Ab Mitte der Achtziger (1984) stieg er wiederum, dies während ca. 20 Jahren.

Seit zirka 2005 stagnierte der Verbrauchswert knapp 10 Jahren und sank nun in den letzten paar Jahren etwas.

Die zeitliche Entwicklung des Energieverbrauchs in den einzelnen Verbrauchergruppen Industrie, Transport und Andere war dabei sehr unterschiedlich.

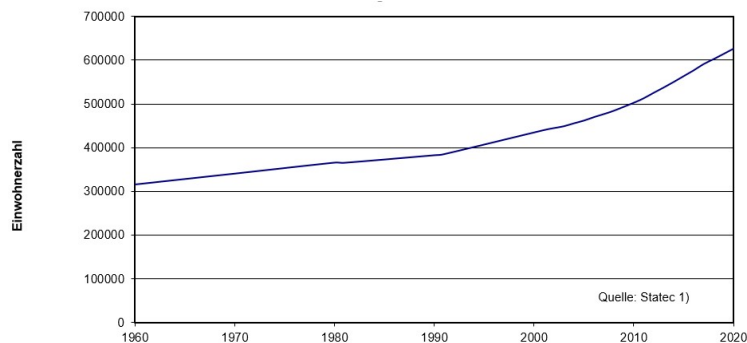
- Der Bereich **Transport** stellt heutzutage mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs dar.

1970 bis 1994 fand im Verkehrsbereich ein stetiger Anstieg statt. Dies zum einen sicherlich aufgrund der vorteilhaften Kraftstoffpreise, von dem Grenzgänger, im Grenzgebiet wohnhafte, luxemburgische Arbeitnehmer und ausländische LKW-Fahrer beim Durchfahren des Landes profitierten.

<sup>1)</sup> eco: Ministère de l'Économie (et du Commerce extérieur)  
public.lu : [www.statistiques.public.lu](http://www.statistiques.public.lu)

Des Weiteren stiegen die Einwohnerzahl Luxemburgs (Abb.10) sowie deren Wohlstand kontinuierlich, weshalb auch die Zahl der zugelassenen Fahrzeuge (Abb.11) ständig stieg.

Abb.10: Anzahl an Einwohner in Luxemburg



1994/1995 wurde seit 20 Jahren zum ersten Mal eine Verringerung des Verbrauchs festgestellt, bedingt durch eine höhere Besteuerung, die 1994 in 2 Stufen eingeführt wurde. Diese führte zu einem etwas geringeren Verkauf an Treibstoff.

Von 1996 bis 2005 stieg der Verbrauch jedoch wieder stetig.

In den vergangenen Jahren ging der Treibstoffverbrauch zurück, bedingt durch geringere Preisdifferenzen zum Ausland (weniger Tanktourismus), allgemein höhere Preise oder bewusst sparsameren Umgang bei den Verbrauchern.

Der Rückgang des Gesamtenergieverbrauchs ging quasi Hand in Hand mit dem Rückgang im Bereich Transport.

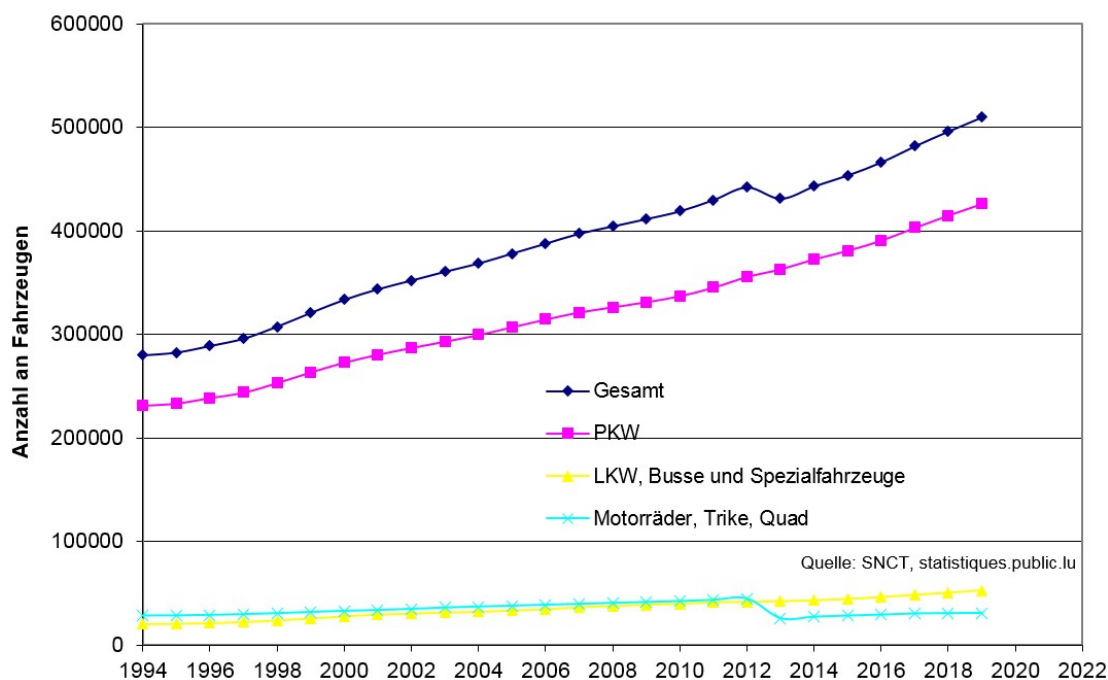


Abb.11: In Luxemburg angemeldete, motorisierte Fahrzeuge

- Der Bereich **Industrie** wurde zunächst maßgeblich durch den Energieverbrauch der Eisen- und Stahlindustrie beeinflusst und stieg daher bis Mitte der siebziger Jahre.

Seitdem hat der Energieverbrauch stark abgenommen. Ende der neunziger Jahre (1997) wurde der letzte Hochofen stillgelegt.

Seit dieser Zeit lag der Energieverbrauch fast 10 Jahre lang auf einem ähnlichen, niedrigeren Niveau. Dies lag zum einen an den stark verringerten Aktivitäten der Stahlindustrie und Umstellung der Herstellungsverfahren. Zum anderen an Verbesserungen des energetischen Wirkungsgrades und strukturellen bzw. technologischen Änderungen in allen Industriebereichen.

<sup>1)</sup> SNCA: Société Nationale de Circulation Automobile

Seither fällt der Verbrauch weiterhin, was hauptsächlich darauf zurückzuführen ist, dass immer weniger Industrie im Land angesiedelt ist.

- Der Bereich „**Andere**“ (**Haushalte, Handel, Handwerk und Landwirtschaft**) zeigt all die Jahre einen stetigen Anstieg. Von 1960 bis heute hat sich der Verbrauch quasi vervierfacht.

Dies ist zum einen sicherlich auf einen Anstieg der Bevölkerung (Abb.12) zurückzuführen. Allerdings ist die Einwohnerzahl in dem Zeitraum von 1960 bis 2015 „nur“ knapp verdoppelt (83%).

Ein weiterer Grund liegt in einem starken Anstieg der Verbraucher in den Haushalten. Dieser ergibt sich aus mehreren Einflüssen:

- steigende Anzahl an Maschinen und Geräten (Kühlgeräte, Küchenmaschinen, Fernseher...)
- vermehrte Nutzung von Wohnungsflächen (Heizung, Licht...)
- zunehmender Komfort (el. Rolläden, Standby-Geräte, Bewegungsmelder für automatische Beleuchtung und sonstige elektrische Verbraucher)

Seit 2010 verändert der Energieverbrauch der Gruppe „Andere“ sich nur wenig.

### Aufgabe 3:

Berechne das Verhältnis des (durchschnittlichen) Energieverbrauchs eines Luxemburgers zum durchschnittlichen Primärenergieverbrauch eines „Weltbürgers“?

(Die erforderlichen Informationen sind in den Diagrammen dieses Kapitels zu finden, verwende die aktuellsten Daten.)

## 4.2 Energieverbrauch nach Energieform

In der nachfolgenden Abb.12 wird die zeitliche Entwicklung des Endenergie-Verbrauchs des Landes seit 1960 dargestellt.

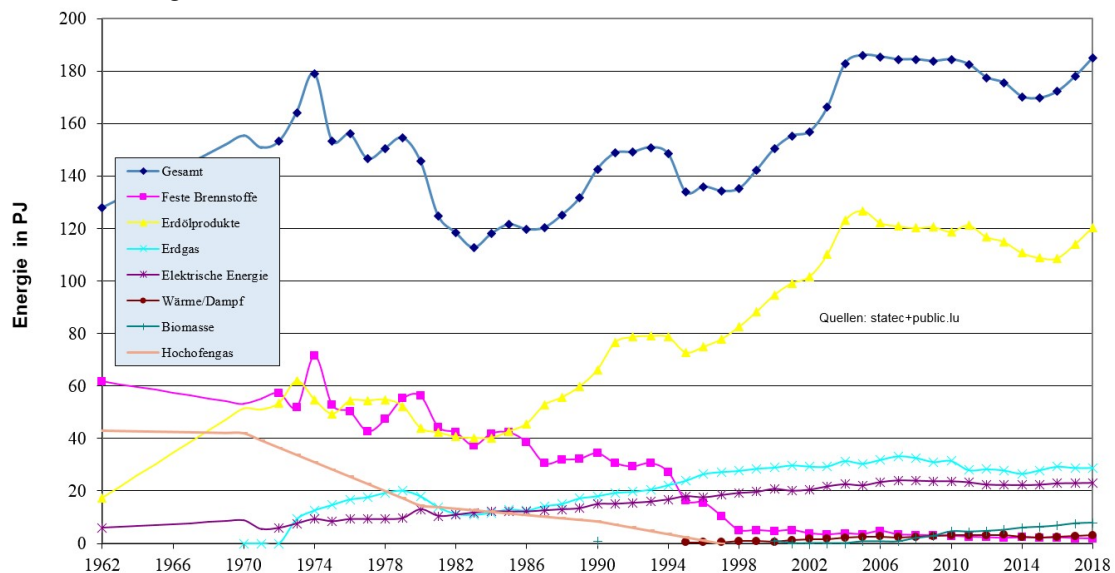


Abb.12: Energie-Verbrauch in Luxemburg nach Energieformen

- Der Verbrauch von **festen Brennstoffen** fällt seit 1974. Dies ist auf verminderte Aktivitäten im Stahlsektor zurückzuführen, insbesondere durch das Umstellen von Hochöfen (die mit Koks betrieben wurden) auf Elektroöfen.
- Die **Erdölprodukte** stellten seit Mitte der siebziger Jahre zunächst ca. die Hälfte der Endenergeträger dar. Bereits in den neunziger Jahren stieg dieser Anteil und liegt mittlerweile bei ca. zwei Dritteln.

Neben der größeren Verbrauchergruppe „Transport“, beeinflusst durch den so genannten „Tanktourismus“, haben die Heizungen (Heizöl) einen Anteil an dem hohen Energieverbrauch.

- Der **Erdgasverbrauch** stieg seit seiner Einführung in Luxemburg kontinuierlich an, da in immer weiteren Teilen des Landes Erdgasanschlüsse verlegt wurden.

Verbraucher sind dementsprechend zum einen die Heizungen, zum anderen die Blockheizkraftwerke, in denen elektrische Energie und Wärme produziert wird.

Die abnehmenden Aktivitäten und die endgültige Stilllegung (2016) der Gas- und Dampfturbinenanlage führten dazu, dass seit 10 Jahren der Erdgasverbrauch etwas abgenommen hat.

- Der Verbrauch an **elektrischer Energie** steigt ebenfalls kontinuierlich an.
- Durch Inbetriebnahme der ersten Blockheizkraftwerke findet man seit 1995 die Energieform **Wärme/Dampf** im Diagramm.
- Der Anteil an **Biomasse** steigt seit 2000 kontinuierlich an.
- Die Produktion an **Hochofengas** spielt seit dem Stilllegen des letzten Hochofens keine Rolle mehr.

### 4.3 Herkunft der elektrischen Energie

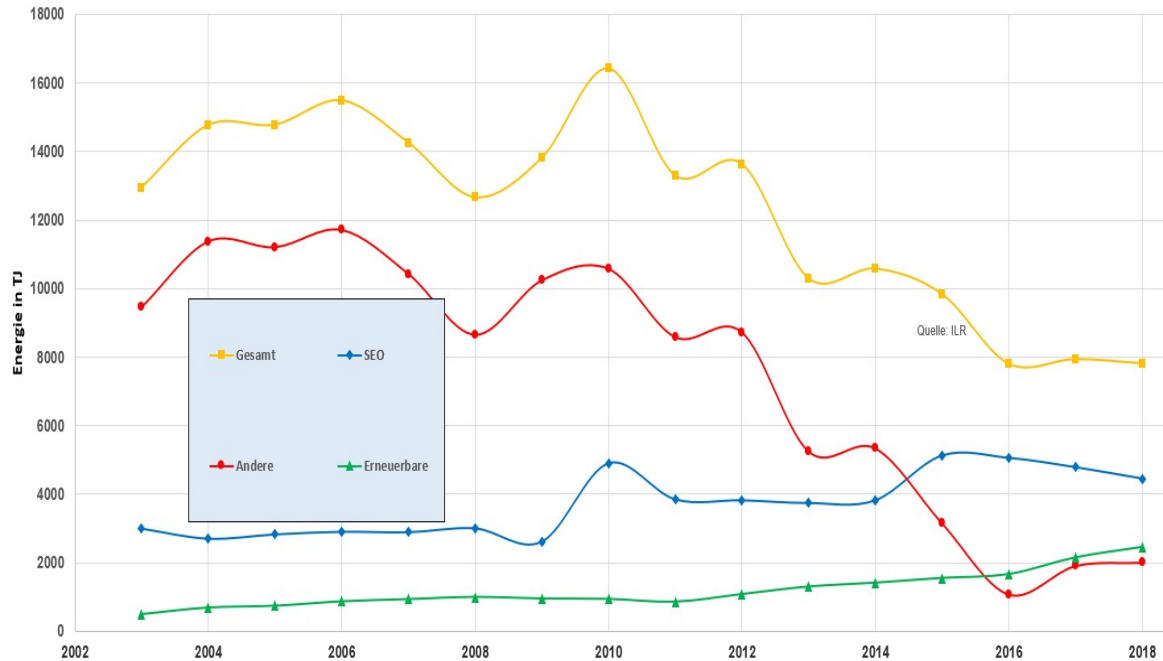


Abb.13: Inländische Produktion an elektrischer Energie

Der größte Anteil an produziertem Strom in Luxemburg kommt von Wasserkraftwerken. Dies sind insbesondere die Laufwasserkraftwerke (Flusskraftwerke) in der Mosel. Hinzu kommen noch kleinere in der Sauer und Our sowie einige in kleineren Bächen.

Die Stromproduktion des Pumpspeicherkraftwerkes in Vianden wird nicht berücksichtigt.

Unter die Bezeichnung „Andere“ fallen hauptsächlich die Blockheizkraftwerke, die in vielen Gemeinden über das ganze Land verteilt zu finden sind.

Hinzu kamen bis 2017 die Stromproduktion der Firma „Twinerg“ in Esch. Deren Produktion hat im Laufe der Zeit sehr abgenommen. Bereits 2016 hat sie ihre Gas- und Dampfturbinenanlage kaum noch in Betrieb gehabt. Der Betrieb wurde 2017 vollständig eingestellt.



In der nachfolgenden Abb.14 wird die zeitliche Entwicklung der inländischen Produktion elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen detaillierter dargestellt.

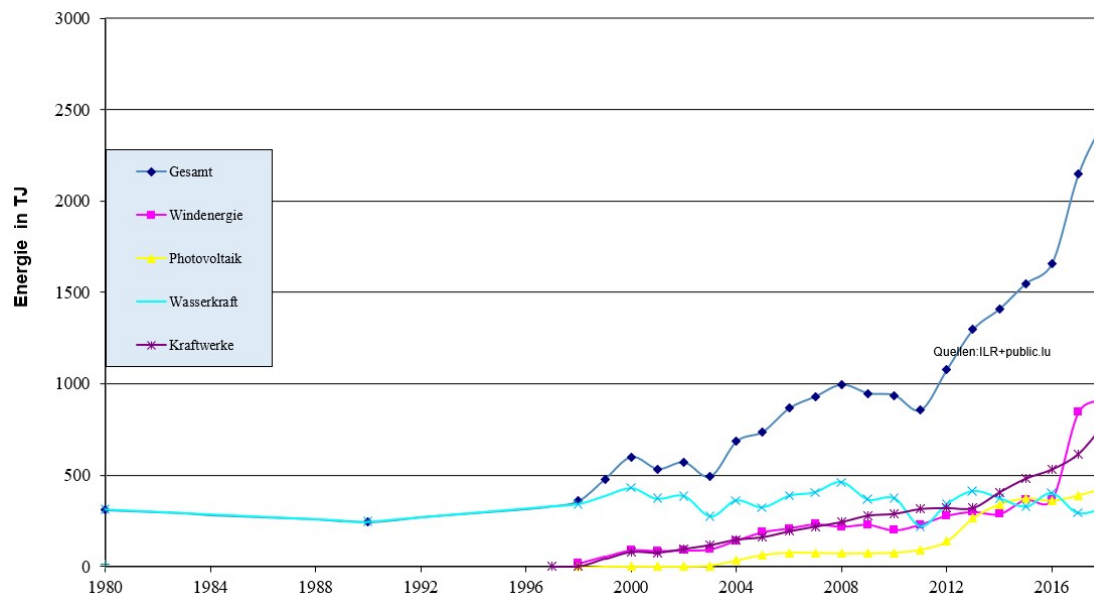


Abb.14: Inländische Produktion an elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen

Zurzeit wird elektrische Energie zu ähnlichen Anteilen aus **Windkraftanlagen, Photovoltaikanlagen, Wasserkraftwerken und Kraftwerken auf Basis erneuerbarer Rohstoffe** produziert.

Unter **erneuerbaren Rohstoffen** für Kraftwerke zählt man:

- Biogas aus landwirtschaftlichen (Abfall-)Produkten
- Altholz und Holzabfälle
- Holzpellets und Holzhackschnittel
- Mülldeponiegas
- Biologisch abbaubarer Anteil vom Hausmüll
- Biogas aus Klärschlamm (Kläranlagen)

- Die Produktion elektrischer Energie aus **Windenergie** spielt in Luxemburg erst seit Beginn dieses Jahrtausends eine Rolle. Sie stieg bisher, stellt aber für die Zukunft noch ein wichtiges Potential an erneuerbarer Energiegewinnung dar.
- Die elektrische Energieproduktion mit **Photovoltaikanlagen** begann gegenüber den Nachbarländern ebenfalls etwas verspätet und in den Anfängen dieses Jahrtausends recht zögerlich. Seit 2012 ist sie jedoch stark angestiegen.
- Die **Wasserkraftwerke** in Mosel und Sauer sowie in einigen kleinen Bächen werden seit vielen Jahrzehnten betrieben. Deren Produktion schwankt von Jahr zu Jahr etwas, es treten allerdings keine wesentlichen Änderungen auf.

Das Pumpspeicherkraftwerk in Vianden wird hier nicht berücksichtigt, unter anderem da es von einem deutschen Betreiber geschaltet wird und entsprechend in das deutsche Netz eingespeist wird.

- **Kraftwerke, die erneuerbare Rohstoffe** verbrennen, produzieren zunehmend elektrische Energie. Zunächst waren es hauptsächlich die Müllverbrennungsanlage der SIDOR und Biogasanlagen landwirtschaftlicher Betriebe, die zur inländischen Produktion elektrischer Energie aus erneuerbaren Rohstoffen beitrugen. (Bei der Müllverbrennungsanlage wird nur der biologisch abbaubare Anteil des Mülls der Stromproduktion aus erneuerbaren Rohstoffen zugerechnet). Mittlerweile wird das Biogas aus den Faultürmen von Kläranlagen und einer Mülldeponie verbrannt. Zudem wird Holz in verschiedenen Formen (Abfälle, Holzhackschnittel und Pellets) zur Produktion elektrischer Energie verwendet. Bei diesen Verbrennungsverfahren (meistens in Blockheizkraftwerken) entsteht gleichzeitig thermische Energie (Wärme), die teilweise bei den Prozessen gebraucht wird, teilweise zu Heizzwecken an Gebäude abgegeben wird.

Die Anteile der erneuerbaren Energien an der luxemburgischen Stromproduktion lagen im Jahr 2007 bei 8,17%. Betrachtete man jedoch deren Anteile am gesamten elektrischen Energieverbrauch, lag man nur noch bei 3,8%.

2018 hat Luxemburg 14,1% seines elektrischen Energieverbrauchs selbst produziert. Die Anteile an erneuerbaren Energien lagen bei 10,4% (ILR-Bericht vom 23. Juli 2019).

Im Rahmen des Pariser Klimaabkommens möchte Luxemburg 11% seiner Energieproduktion erneuerbar produzieren.

Ab 2021 soll dieser Wert durch den Bau weiterer Windparks, die insgesamt 1,4 PJ produzieren, mit ca. 13% sogar überschritten werden. (Stand dieser Aussagen: 27.März 2018)

#### **Aufgabe 4:**

Wie hoch ist der aktuellste Anteil der in Luxemburg produzierten, erneuerbaren elektrischen Energie am elektrischen Verbrauch Luxemburgs?

(Die erforderlichen Informationen sind in den Diagrammen dieses Kapitels zu finden.)

#### **Mach dir Gedanken!**

Welchen Einfluss haben diese Zahlenwerte d.h. die Situation in Luxemburg auf das Einhalten des Abkommen der Weltklimakonferenz von Paris (Nachfolge des Kyoto-Abkommens)?

## C Regenerative Energien

### 1 Übersicht

In dem letzten Kapitel haben wir bereits gesehen, daß die Menschheit ihr Energieversorgungssystem einseitig auf die fossilen Energieträger aufgebaut hat. Andere Energieträger haben derzeit nur untergeordnete Bedeutung. Daraus ergeben sich zwei wichtige Probleme für die zukünftige und umweltgerechte Energieversorgung:

- die fossilen Energieträger erschöpfen sich in absehbarer Zeit und, derzeit noch drängender,
- sie schädigen die Umwelt derart, daß die natürlichen Lebensgrundlagen der Menschheit gefährdet werden (Treibhauseffekt, Luftschadstoffe u.a.)

Beide Probleme können durch verstärkte Nutzung regenerativer Energien entschärft werden:

Als regenerative oder erneuerbare Energiequellen bezeichnet man Energiequellen, die sich auf natürliche Weise selbstständig und unabhängig von ihrer Nutzung erneuern.

Da die regenerativen Energien ohnehin umgesetzt werden, unabhängig davon, ob durch den Menschen genutzt oder nicht, und da sie in der Regel emissionsfrei sind, ist zu erwarten, daß ihre Nutzung die Umwelt weniger beeinträchtigen wird als das exzessive Verbrennen fossiler Energieträger.

Eine Übersicht über die regenerativen Energiequellen gibt Abb.1.

Fragt man sich, aus welchen Quellen die aufgelisteten regenerativen Energiequellen eigentlich gespeist werden, so erkennt man, daß sie bis auf wenige Ausnahmen von der auf die Erde einfallenden Sonnenstrahlung ihre Energie beziehen.

Das gilt in **direkter** Weise natürlich für die angegebene **Solarstrahlung**, die mit unterschiedlichen Umwandlungssystemen auf vielfältige Weise genutzt werden kann.

In **indirekter** Weise sind die **Wind-** und die **Wasserkraft** ebenfalls auf die Sonneneinstrahlung zurückzuführen.

Auch **Biomasse**, wie Holz oder sonstige Pflanzen, entsteht über die Fotosynthese mittels Sonnenlicht. Auf dem Weg über die Pflanzen schließlich findet man gespeicherte Sonnenenergie auch in der Biomasse von Tieren, wie beispielsweise in der Gülle.

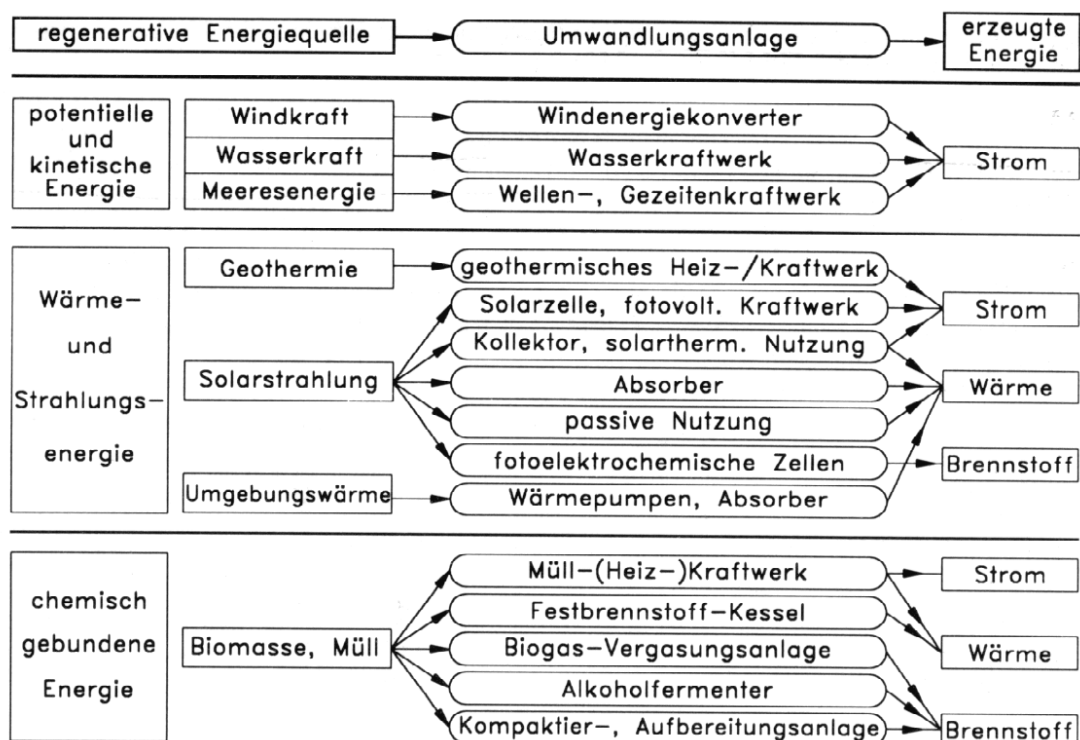


Abb.1: Übersicht über die regenerativen Energiequellen und ihre Umwandlungssysteme

Die **Umgebungswärme** in der Luft, im Wasser und im Boden, die mit Hilfe von Wärmepumpen genutzt werden kann, stellt rein mengenmäßig den größten regenerativen Energiespeicher dar; er wird ebenfalls hauptsächlich durch die Sonneneinstrahlung gefüllt.

Es sei der Vollständigkeit halber noch darauf hingewiesen, daß auch die fossilen Energieträger nichts anderes als gespeicherte Sonnenenergie sind, die sich in einem erdgeschichtlich einmaligen Vorgang aus organischen Stoffen gebildet haben.

Damit sind die in Abb.1 genannten regenerativen Energieträger bis auf die Meeresenergie, die Geothermie und den Müll solaren Ursprungs.

Die **Meeresenergie** ist, was die Gezeiten, also das Wechselspiel zwischen Ebbe und Flut anbelangt, auf die Gravitationskräfte zwischen Erde und Mond sowie Erde und Sonne zurückzuführen. Die Wellenbewegung hingegen wird in erster Linie durch den Wind und damit ebenfalls durch die Sonneneinstrahlung in Gang gesetzt.

Mit **Geothermie** ist Wärme aus dem Erdinneren gemeint, sie wird einerseits gespeist durch den heißen Kern der Erde und andererseits durch radioaktive Zerfälle in der Erdkruste.

Bleibt schließlich der **Müll**, der sicher nicht zu den klassischen regenerativen Energieträgern gehört. Man nimmt ihn mit hinzu, weil er ohnehin anfällt. Seine energetische Verwertung dient mehr der Entsorgung als der Versorgung mit Energie.

## 2 Nutzung der Sonnenenergie

Ohne die von der Sonne auf die Erde eingestrahlte Energie wäre Leben auf dem Planeten Erde nicht möglich. Ihre aus Kernfusionsprozessen erzeugte und abgestrahlte Energie, die gesamte Strahlungsleistung der Sonne, beträgt  $4,0 \cdot 10^{23}$  kW, trifft nur zu knapp einem halben Milliardstel auf die Erde.

Die an der Grenze der Erdatmosphäre ankommende Strahlung beträgt bei senkrechtem Einfall  $1,37 \text{ kW/m}^2$ , diesen Wert bezeichnet man als **Solarkonstante**. Dies führt auf der gesamten Erde zu einem jährlichen solaren Energiestrom von rund  $5,6 \cdot 10^{24}$  J.

Bei durchschnittlicher Bewölkung werden bereits 31 % der eingestrahlten Energie an der Atmosphäre reflektiert.

Bei Überlegungen zu Nutzungsmöglichkeiten der Sonnenstrahlung sind die regionalen Einstrahlungen von Interesse:

Der durchschnittliche Wert der Globalstrahlung beträgt in Deutschland  $1000 \text{ kWh/m}^2$  im Jahr, das ergibt eine mittlere Einstrahlleistung von  $114 \text{ W/m}^2$ . In sonnenreichen, äquatorialen Ländern wird mehr als das Doppelte eingestrahlt.

Natürlich hängt die Strahlleistung von den Wetterverhältnissen ab. Die Ergebnisse für Deutschland sind in folgender Abb.2 dargestellt.

Wetter	Hochsommer bei klarem Himmel	Leichte Bewölkung	Diesiger Sommertag	Trüber Wintertag
Gesamte Strahlungsleistung	$1000 \text{ W/m}^2$	$600 \text{ W/m}^2$	$300 \text{ W/m}^2$	$100 \text{ W/m}^2$
Durchschnittliche Strahlleistung in Deutschland		$114 \text{ W/m}^2$		
Jährlich in Deutschland eingestrahlte Energie		$1000 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$		

Abb.2: Globale Sonneneinstrahlung in Deutschland

Die pro Jahr und pro  $\text{m}^2$  in Deutschland eingestrahlten  $1000 \text{ kWh}$  ergeben auf die Gesamtfläche Deutschlands umgerechnet  $3,57 \cdot 10^{14}$  kWh eingestrahlte Sonnenenergie pro Jahr, das ist etwa das 90fache dessen, was die hoch industrialisierte Bundesrepublik jährlich an Primärenergie verbraucht.

Es ist aber zu bedenken, daß nur ein Bruchteil der Gesamtfläche der Bundesrepublik zur Sonnenenergienutzung herangezogen werden könnte, etwa die ohnehin überbaute Fläche.

Weiter ist auch noch der Wirkungsgrad der Sonnenenergiewandler zu berücksichtigen.

Erschwerend kommt hinzu, dass das Energieangebot der Sonne und die Energienachfrage (siehe Abb.3) sich zeitlich unterscheiden, was leistungsfähige Speichersysteme erforderlich macht.

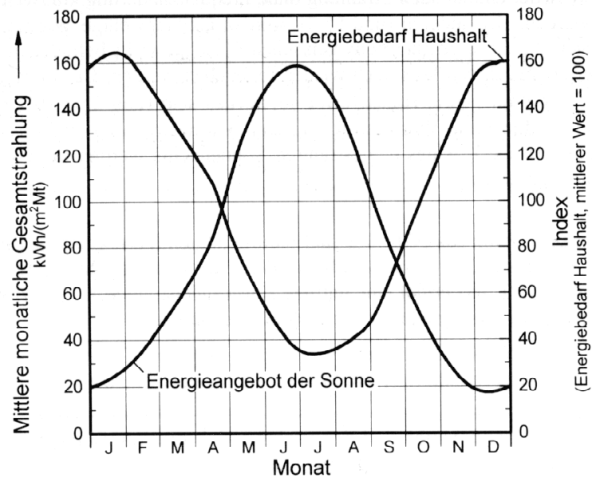


Abb.3: Energieangebot der Sonne im Vergleich zum Energiebedarf der Haushalte

Diese Überlegungen zeigen, daß die relativ sonnenarme, aber energiehungrige Bundesrepublik ihren Energiebedarf nicht allein aus „ihrer“ Sonnenenergie decken kann. Nichtsdestoweniger entlastet jede von der Sonne bezogene kWh die Umwelt, weil entsprechend weniger fossile Energieträger verbrannt werden müssen.

Für die technische Nutzung der Sonnenenergie gibt es im Prinzip zwei unterschiedliche Varianten:

- die **thermische** Energieumwandlung  
(Umwandlung des Energieflusses der Sonne in Wärmeenergie)
- die **photovoltaische** Energieumwandlung  
(Umwandlung des Sonnenlichts in elektrische Energie mittels halbleitender Solarzellen).

## 2.1 Thermische Nutzung der Sonnenenergie

Die einfachste Möglichkeit der Sonnenenergienutzung besteht darin, die Wärmewirkung der Sonneneinstrahlung auszunutzen. Dabei ist auch die Art der Sonneneinstrahlung zu beachten. In Deutschland fallen nur etwa 1/3 der Sonnenenergie in Form von direkt eingestrahltm Sonnenlicht, 2/3 dagegen in Form von diffuser Streustrahlung an. Die Direktstrahlung dominiert in äquatornäheren Gegenden, insbesondere in Wüstenregionen. So ist es in Deutschland sinnvoll, mit Nutzungssystemen auch die diffuse Strahlung einzufangen, während in Wüstenregionen Systeme zur Nutzung der Direktstrahlung eingesetzt werden können. Auf einige Möglichkeiten, Solarenergie thermisch zu nutzen, wird im Folgenden eingegangen.

### ○ Passive Nutzung

Durch eine klimagerechte Planung und Bauweise von Gebäuden kann Sonnenenergie zu Heizzwecken genutzt werden, ohne daß zusätzliche Systeme erforderlich sind.

Um Wärmegewinne erzielen zu können, muß ein Gebäude auf der Südseite große Fenster besitzen (Abb.4), durch welche die Sonnenstrahlung auch bei niedrigem Sonnenstand im Winter in das Gebäude eindringen kann. Dadurch erwärmen sich die Wände und Böden im Inneren tagsüber und geben nachts die gespeicherte Sonnenenergie in Form von Wärme wieder ab. Das Gebäude benötigt eine optimale Wärmeisolierung, damit die in den Gebäudemassen gespeicherte Sonnenenergie möglichst lange im Gebäude bleibt.

In der warmen Jahreszeit müssen Vorrichtungen zur Abschaltung der Fensterflächen und Lüftungsmöglichkeiten vorhanden sein, um eine Überhitzung zu verhindern.

Niedrigenergie-, Passiv-, Nullenergie und Plusenergiehäuser, die in zunehmendem Maße gebaut werden, berücksichtigen diese Solararchitektur.

Abb.4: Passivhaus Schiestlhaus in Hochschwab (Österreich)



## Passivhäuser in Luxemburg

Einer EU-Richtlinie zufolge müssen ab 2020 alle Häuser in passiver Bauweise gebaut werden.

Bereits seit dem 1. Januar 2017 müssen Häuser in Luxemburg als Passivhäuser gebaut werden. Luxemburg war damit Vorreiter der europäischen Richtlinie.

Damit ein Haus als Passivhaus eingestuft wird, muss es folgende Anforderungen erfüllen:

- Effizienzklasse (Abb.) A für die **Gesamtenergieeffizienz** (Primärenergiebedarf)
- Effizienzklasse A für den **Wärmeschutz** (Heizwärmebedarf)
- Effizienzklasse A für die Umweltwirkung **CO<sub>2</sub>-Emissionen**
- Die **Luftdichtigkeit** der Gebäudehülle muss unter 0,6/h liegen
- Des Weiteren darf **keine** (fest installiert) **Klimaanlage** eingebaut sein.

Die Effizienzklassen werden in einem **Energiepass** (Abb.5) bescheinigt.

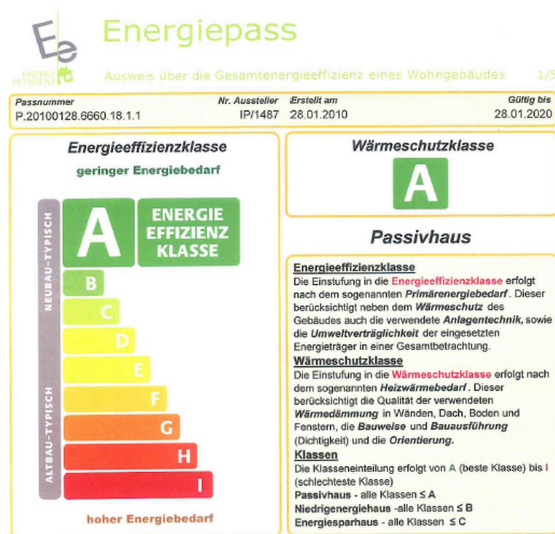


Abb.5: Energiepass (Quelle: <http://www.a-konzepthaus.de>)

Zur Gesamtenergieeffizienz: Der Primärenergiebedarf stellt die Summe der Energiemengen dar, die zum **Heizen** und zur **Warmwasserversorgung** erforderlich sind. Hinzu gerechnet werden die Energiemengen, die zur Herstellung, Umwandlung und Transport der **Nutzenergie** erforderlich sind.

Der Primärenergiebedarf muss **unter 45 kWh/(m<sup>2</sup>a)** liegen, um der Effizienzklasse A zu entsprechen.

Zum Wärmeschutz: Der Heizwärmebedarf ist die Wärmeenergie, die zum Heizen des Gebäudes erforderlich ist.

Der Heizwärmebedarf muss **unter 22 kWh/(m<sup>2</sup>a)** liegen, um der Effizienzklasse A zu entsprechen.

Zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen: Hier wird das CO<sub>2</sub>-Äquivalent der klimaschädigenden Gase berücksichtigt, die beim Beheizen des Hauses freigesetzt werden.

Zusätzlich zu den eigentlichen Emissionen (des Hauses) werden die bei der Energiegewinnung, -aufbereitung und -transport entstandenen Emissionen berücksichtigt.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen **unter 11 kg CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>a)** liegen, um der Effizienzklasse A zu entsprechen.

Zur Luftdichtigkeit: Nach Beendigung der Bauarbeiten wird am Haus ein **Blower-Door-Test** durchgeführt. Mit diesem ermittelt man, wie luftdicht das Haus ist. Bei einer bestimmten Druckdifferenz zu Außen (z.B. 50 Pa) wird der Luftstrom (Luftvolumen pro Zeit) gemessen, der ausgetauscht wird. Diesen bezieht man auf das Volumen des Hauses und erhält einen Zahlenwert in einer Einheit Eins pro Zeiteinheit.

Dieser Zahlenwert, die sogenannte **Luftwechselrate n50**, beschreibt, wie oft das Luftvolumen des Gebäudes in einer Zeiteinheit (normalerweise pro Stunde) bei einer Druckdifferenz von 50 Pa ausgetauscht wird.

Ein Passivhaus muss in Luxemburg eine Luftwechselrate n50 **kleiner 0,6 1/h** haben.

### Wärmezufuhr

Die hohe Energieeffizienz wird vor allem durch passive Komponenten (z. B. Wärmeschutzfenster, Dämmung) erreicht.

Die erforderliche Wärmeenergie kann teilweise über **Solarkollektoren** produziert werden.

Ein Teil der Heizwärme entsteht über die **Wärmeabgabe** der **Menschen**, die im Haus sind.

Der zusätzliche, recht geringe Heizwärmebedarf wird meistens über eine **Wärmepumpe** oder eine **Feuerungsanlage** nachwachsender Rohstoffe (Holz, Holzhackschnitzel oder Holzpellets) gewährleistet.

Die Heizwärme kann teilweise über eine **Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung** rückgewonnen werden. Mit dieser wird die Wärmeenergie der aufgeheizten, verbrauchten Luft aus dem Haus an die von außen frisch zugeführte Luft abgegeben.

## ○ Aktive Nutzung

### Sonnenkollektoren

Die einfachsten Systeme zur aktiven Nutzung der Sonnenenergie sind so genannte **Absorber**. Dabei handelt es sich um einen Gegenstand (Platte, Rohr) mit geschwärzter Oberfläche, welche die direkte und diffuse Sonnenstrahlung absorbiert und in Wärme umwandelt. Durch das Schwarze wird ein hoher Absorptions- und ein geringer Reflexionsgrad der einfallenden Sonnenstrahlung erreicht.

Daß dieses einfache Prinzip wirkungsvoll funktioniert, kann jeder mit einem einfachen Gartenschlauch ausprobieren. Setzt man einen mit Wasser gefüllten Gartenschlauch längere Zeit der Sonnenstrahlung aus, so erreicht das Wasser beachtliche Temperaturen, es besteht sogar die Gefahr daß der Schlauch platzt. Reine Absorbersysteme haben den Nachteil, daß sie einen Teil der gewonnenen Wärme wieder abstrahlen.

Genau das verhindern sogenannte **Kollektoren**. Sie bestehen (Abb.6) im Wesentlichen aus einem Absorber, einer oder zwei lichtdurchlässigen Abdeckungen, einer rückseitigen Wärmedämmung und einem Rohrsystem zum Abtransport der gewonnenen Wärme mit Hilfe eines Wärmeträgers, bspw. Wasser. Das Ganze ist in einem Gehäuse untergebracht.

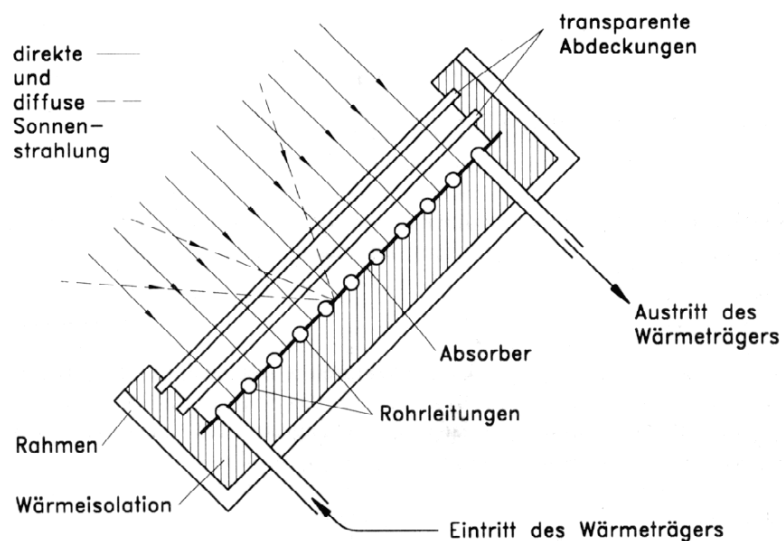


Abb.6: Aufbau eines Flachkollektors

Die Funktionsweise des Kollektors ist offensichtlich. Die transparente Abdeckung und die Isolierung verringern die Abstrahlungsverluste des erwärmten Absorbermaterials. Dadurch werden höhere Temperaturen erreicht als bei reinen Absorbersystemen.

Bei **Vakuumpollektoren** wird zusätzlich noch der Raum zwischen Absorber und Abdeckung evakuiert, wodurch sich die Abstrahlungsverluste fast vollständig unterbinden lassen.

Sonnenkollektoren werden üblicherweise auf der südlichen Seite der Hausdächer montiert. Sie wandeln das eingestrahelte Licht zu etwa 60 % (Vakuumpollektoren sogar bis 90 %) in Wärme um. Diese gewonnene Wärme wird über einen Wärmetauscher abgegeben, meist zur Aufheizung von Brauchwasser. Nachfolgende Abb.7 zeigt ein derartiges Anlagenschema.

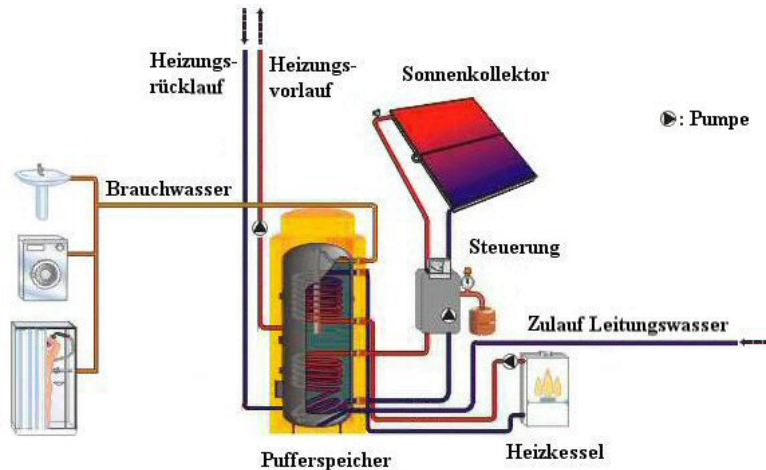


Abb.7: Schematisch dargestellte Kollektoranlage zur Warmwasserbereitung

Will man die Kollektoranlage zur Raumheizung nutzen, so benötigt man auch in der kühleren Jahreszeit ein höheres Temperaturniveau, als es die Kollektoranlage zu liefern vermag.

Das kann durch Zwischenschalten einer **Wärmepumpe** realisiert werden, die als kalte Seite den Kollektor benutzt. Je nach Kollektorfläche können damit in unseren Breiten bis zu 60 % der Heizwärme von der Sonne bezogen werden. Zur Überbrückung der kältesten Tage ist aber nach wie vor ein konventionelles Heizsystem erforderlich.

### Aufgabe 1:

Berechne die benötigte Oberfläche in Luxemburg, um den Wärmebedarf im Land mit Sonnenkollektoren zu decken.

Wieviel Prozent der Landoberfläche macht dies aus?

### **Konzentrierende Kollektoranlagen**

Mit den beschriebenen Sonnenkollektoren können in Luxemburg Temperaturen von knapp 100°C erreicht werden.

Durch Fokussierung von direkt einstrahlendem Sonnenlicht erreicht man wesentlich höhere Temperaturen, die in Gegenden von hoher Direkteinstrahlung eine Stromproduktion ermöglichen. Hierzu müssen die Sonnenstrahlen durch große Reflektorflächen auf eine kleine Absorberfläche konzentriert werden, man spricht daher von konzentrierenden Kollektoranlagen. Diese werden auch als Farmanlagen oder Solarfarmen bezeichnet.

Man unterscheidet mehrere Bauformen, hier die beiden bisher am meisten gebauten:

### **Parabolrinnenanlage**

Parabolrinnenanlagen bestehen, wie Abb.8 zeigt, aus lang gestreckten Spiegelrinnen mit parabolischem Querschnitt. Damit wird die einfallende Direktstrahlung auf die Brennlinie fokussiert. Die Parabolspiegel (Abb.9) müssen dem Sonnenstand nachgeführt werden, damit möglichst hohe Einstrahlwerte erzielt werden.

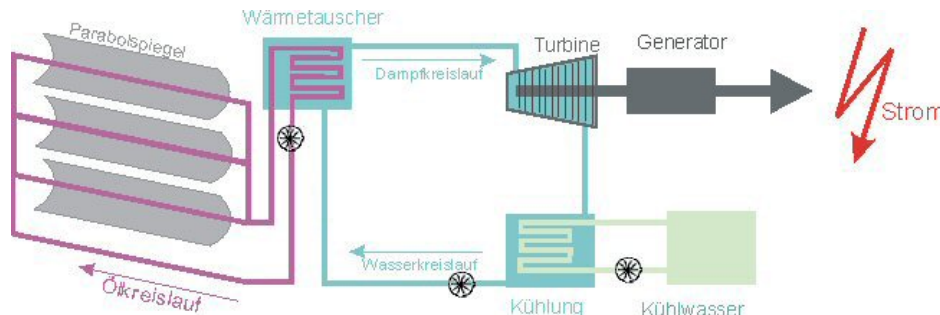


Abb.8: Solarkraftwerk mit Parabolrinnenanlage



In der Brennlinie befindet sich ein Absorberrohr, durch das ein Wärmeträger (z.B. Thermoöl) strömt. Damit kann über einen Wärmetauscher eine Turbine angetrieben werden, so daß auf konventionelle Art während der Sonnenstunden Strom erzeugt wird.

Erste Anlagen mit Leistungen zwischen 14 und 30 MW wurden 1985 in Kalifornien errichtet. Seit Sommer 2008 produziert die europäische 49,9 MW-Anlage Andasol 1 in Südspanien jährlich 157 GWh elektrische Energie, wobei die Anlage durch Tanke mit flüssigem Salz bis zu 7 Stunden Energie speichern kann.



In den nächsten Jahren werden die beiden gleichen Anlagen Andasol 2 und 3 fertig gestellt.

Abb.9: Parabolrinne

### Spiegelkollektoranlagen



Mit Spiegelkollektoranlagen (oder Solarturmkraftwerk) werden die Sonnenstrahlen von einem großen Feld von einigen hunderten bis tausende Spiegeln (Abb.10) auf einen zentralen Brennpunkt reflektiert. Die Spiegel, sogenannte **Heliostaten**, sind um 2 Achsen beweglich, damit sie der Sonne nachgeführt werden können. Der Brennpunkt, in dem der **Absorber** mit dem Wärmeträger ist, befindet sich in einem 50 bis 150 m hohen Turm. Als Wärmeträger werden Wasser oder geschmolzene Salze verwendet, die mittels Wärmetauscher einen Wasserkreislauf mit Dampfturbine und angekoppeltem Generator erwärmen.

Die im Absorber erreichbaren Temperaturen liegen bei einigen tausend Grad Celsius, eine technisch sinnvolle Temperatur ist ca. 1300°C. Diese ist wesentlich höher als bei Parabolrinnenanlagen, so dass der thermodynamisch erreichbare Wirkungsgrad der Anlage höher ist.

Abb.10: Spiegelkollektoranlage in Daggett, Kalifornien

Dem gegenüber ist der technische Aufwand zur horizontalen und vertikalen Nachführung der vielen Heliostaten wesentlich höher.

Die erste Anlage dieser Art war der Solarschmelzofen (Abb.11) in Odeillo Font-Romeu (Pyrinäen), in dem ab 1972 Materialforschung bei Temperaturen bis 3800°C betrieben wurde.

Die zurzeit größten Spiegelkollektoranlagen sind „PS10“ in Sevilla, Spanien (11 MW) und „Solar Two“ (10 MW) in Daggett, Kalifornien.



Abb.11: Solarschmelzofen in Odeillo Font-Romeu

## 2.2 Photovoltaische Nutzung der Sonnenenergie



Abb.12: Solarmodule am London City Hall Building

Die technisch anspruchsvollste Nutzung der Sonnenenergie besteht darin, die einfallende Lichtenergie direkt - ohne Wärme als Zwischenstufe - in elektrische Energie umzuwandeln. Diese Umwandlungstechnik bezeichnet man als **Photovoltaik**.

Realisiert wird die Umwandlung mit Hilfe so genannter **Solarzellen**, das sind in der Regel aus Silizium bestehende Halbleiterbauelemente.

Eine Solarzelle besteht, wie Abb.13 zeigt, im Wesentlichen aus zwei unterschiedlich dotierten, dünnen Halbleiterschichten - einer **p-** und einer **n-dotierten Schicht**.

In der n-Schicht sind frei bewegliche negative Ladungsträger, **Elektronen**, vorhanden.

In der p-Schicht sind es frei bewegliche positive Ladungsträger, sogenannte **Löcher**.

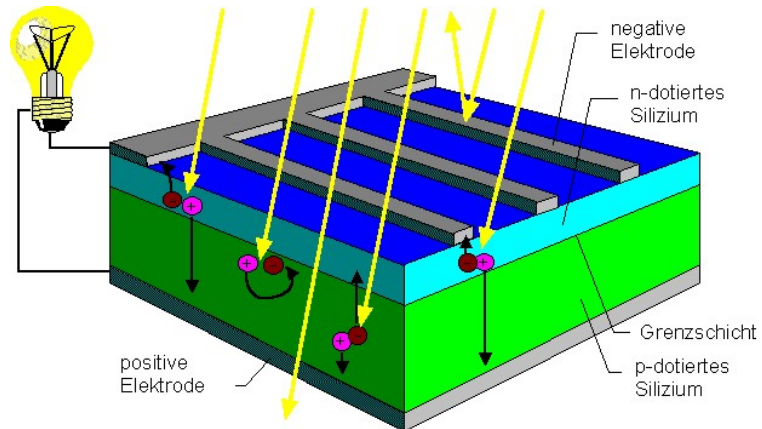


Abb.13: Schematischer Aufbau einer Solarzelle

Löcher verhalten sich wie frei bewegliche positive Ladungsträger, tatsächlich sind es fehlende Elektronen in einer ursprünglich neutralen Bindung im Kristallgitter.

Die Grenze zwischen beiden Schichten, der pn-Übergang, spielt die entscheidende Rolle beim photovoltaischen Effekt. Dort ist ein inneres elektrisches Feld ausgebildet, das ein Spannungsgefälle am pn-Übergang bewirkt, und zwar so, daß auf der n-Seite der Pluspol und auf der p-Seite der Minuspol dieser inneren Spannung liegt. Im Bereich des pn-Übergangs bildet sich eine **an freien Ladungsträgern verarmte Sperrschicht** aus.

Trifft nun ein Lichtstrahl mit ausreichender Energie auf ein Bindungselektron in der Sperrschicht, so wird das Elektron aus der Bindung herausgelöst, es entsteht ein **Elektron-/Loch-Paar**, also ein freier negativer und ein freier positiver Ladungsträger. Aufgrund des Spannungsgefälles wird das Elektron zur positiven Seite der Spannung, in das n-Gebiet, und das Loch in das p-Gebiet gezogen. Es findet also eine **Ladungstrennung** statt, das ist das Kennzeichen einer Spannungsquelle.

Wird die Solarzelle weiterhin bestrahlt, so reichert sich das n-Gebiet mit Elektronen und das p-Gebiet mit Löchern an, und zwar so lange, bis die dadurch sich aufbauende äußere Spannung so groß ist wie die innere Spannung und diese kompensiert. Das ist die sogenannte **Leerlaufspannung** der Solarzelle. Schließt man den äußeren Stromkreis, so fließt ein Strom.

Um höhere Ströme und Spannungen zu erhalten, setzt man nicht einzelne Solarzellen ein, sondern verwendet sogenannte **Solarmodule** oder **-panels**, bei denen mehrere Solarzellen in Reihen- und Parallelschaltung zu einer Einheit zusammengefasst sind.

Die technische Herstellung von Solarzellen ist verfahrenstechnisch, aber auch energetisch sehr aufwendig. Praktisch sind ähnlich hohe Anforderungen zu erfüllen wie bei der Herstellung von anderen

Halbleiterbauelementen. Da die gefertigte Stückzahl (noch?) relativ gering ist, sind sie vergleichsweise teuer. Meist wird Silicium als Halbleitermaterial verwendet, wobei die Faustformel gilt, je aufwendiger die Herstellungsverfahren, desto besser die technischen Kennwerte und umso höher der Preis.

Neben den Solarmodulen sind für eine funktionierende Solaranlage in der Regel Energiespeicher in Form von Akkumulatoren, ein Laderegler und ein MPP-Regler (Maximum-Power-Point, benötigt, um eine größte Leistungsabgabe zu ermöglichen) erforderlich. Solche Anlagen rechnen sich am ehesten im Inselbetrieb, wo ein Anschluss an das öffentliche Versorgungsnetz hohe Investitionen erfordern würde. Deshalb findet man Solarpanels bereits bei unzähligen Anwendungen wie Parkautomaten, Notrufsäulen, Wohnmobilen, Bojen, Berghütten usw. Freilich fallen diese Anwendungen energetisch bislang kaum ins Gewicht.

Schließlich werden zunehmend Solarmodule auf Hausdächern montiert, wozu auch das 1000-Dächer-Programm der Bundesregierung beigetragen hat. Um Solarstrom in das Netz einspeisen zu können, sind sogenannte Wechselrichter erforderlich, die den Gleichstrom der Solarzellen in Wechselstrom umwandeln.

### Wirkungsgrad

Der theoretische Wirkungsgrad von Solarzellen liegt - je nach Halbleitermaterial - bei rund 25 %. Mit zunehmender Betriebstemperatur sinkt der Wirkungsgrad. Im praktischen Betrieb werden diese hohen theoretischen Werte nicht annähernd erreicht. Wichtiger für die Praxis ist der **Modulwirkungsgrad**, er ist schon deshalb geringer, weil die Modulfläche größer ist als die Summe der Zellenflächen.

Im Dauerbetrieb ergibt sich ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von ca. 10 %.

Tatsächlich variieren die realen Wirkungsgrade verschiedener Solarmodule zwischen 5 und 18 %, je nach eingesetzter Herstellungsmethode:

**monokristalline** Solarzellen haben den höchsten Wirkungsgrad und sind am aufwendigsten herzustellen,

**polykristalline** Zellen nehmen beim Wirkungsgrad einen Mittelplatz ein und **amorphe** haben den geringsten Wirkungsgrad, sind aber auch am billigsten.

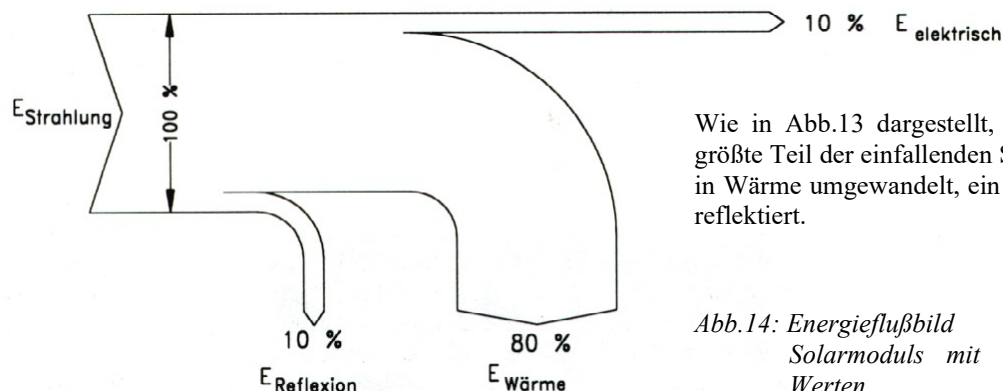


Abb.14: Energieflussbild eines Solarmoduls mit typischen Werten

Aus dem Wirkungsgrad eines Solarmoduls ergibt sich die erforderliche Größe, damit das Modul eine gewisse Leistung abgeben kann.

Für Luxemburg kann man sagen, dass Solarmodule mit einer Leistung von 1 kW (genaue Bezeichnung  $1 \text{ kW}_{\text{Peak}}$ ), wenn sie unter einem Neigungswinkel von ca. 30 Grad nach Süden ausgerichtet sind, jährlich ca. 850 kWh elektrische Energie produzieren sollten.

### Aufgabe 2:

Ausgehend von einem Solarmodul von  $1 \text{ m}^2$ :

- Welche elektrische Leistung erhält man bei der höchsten in Deutschland auftretenden Einstrahlung?
- Welche elektrische Leistung erhält man bei ungünstigen Wetterbedingungen?
- Wie viel elektrische Energie (solare Ernte) kann in einem Jahr erzeugt werden?
- Der Preis für das Solarmodul liegt bei etwa 500€. Strombetreiber Enovos zahlt 0,095 €/kWh. Wann ist das Modul amortisiert?

### Anmerkung

Man hofft, die realen Wirkungsgrade in Zukunft deutlich verbessern zu können. Zudem soll durch Dünnschichtsiliziumzellen der Material- und Energieaufwand gesenkt werden. Insbesondere würden höhere Stückzahlen den Preis reduzieren - man schätzt auf etwa  $150 \text{ €/m}^2$ .

**Aufgabe 3:**

Der Jahresstrombedarf eines durchschnittlichen Haushalts beträgt 4500 kWh. Wie groß muß die Solarzellen-Fläche ausgelegt werden, wenn der Strom ausschließlich solar erzeugt werden soll?

**Lösung 3:**

Da pro m<sup>2</sup> und Jahr etwa 100 kWh erzeugt werden können, sind 45 m<sup>2</sup> erforderlich. Das ist eine Fläche, die ein Eigenheimbesitzer als Dachfläche zur Verfügung haben kann. Es muß allerdings für optimale Einstrahlverhältnisse (Südseite, keine Abschattung) gesorgt werden, so daß die angegebene Fläche eher die untere Grenze darstellt. Zusätzlich wurde das Problem der Energiespeicherung (die Sonne scheint tagsüber - Strom zur Beleuchtung ist nachts erforderlich) nicht berücksichtigt, durch das die Ausbeute an elektrischer Energie weiter vermindert wird. Mit üblichen Batteriespeichersystemen läßt sich der Solarstrom einige sonnenlose Tage vorhalten, das Problem der Überbrückung der sonnenarmen Winterzeit ist jedoch ungelöst, so daß nach gegenwärtigem Stand der Technik eine 100%ige Eigendeckung nicht sinnvoll erscheint. Zudem sind die Investitionskosten für eine derartige Anlage noch so hoch, dass sich unter rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten die Errichtung einer solchen Anlage nicht rentiert.

**Fazit:**

Die Photovoltaik ist eine innovative Technik zur geräuschlosen und emissionsfreien Energiegewinnung, die in vielen Nischenbereichen, von der Armbanduhr über den Parkautomaten bis zum Campingplatz, Einsatzgebiete hat.

Sie wird auch zunehmend in Gebäude integriert werden ( Fassaden von Hochhäusern, auf Dächern von Wohnhäusern). Einen spürbaren Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs eines Landes wie Luxemburg oder Deutschland wird sie in absehbarer Zukunft nicht leisten können.

**2.3 Solar-Wasserstoff-Technik**

Die regenerativen Energiequellen bieten ein zeitlich stark schwankendes, sogenanntes intermittierendes Energieangebot, das in der Regel nicht zeitgleich mit der Energienachfrage auftritt. Es stellt sich deshalb für die Nutzung regenerativer Energie das Problem der **Energiespeicherung**.

Zudem liegen die Angebots- und Nachfrage regenerativer Energien oft weit auseinander (Sonnenenergieangebot in der Sahara - Nachfrage nach Solarstrom in Luxemburg), so daß sich auch die Frage nach dem **Transport** der Energie stellt.

Eine Vision, die sowohl das Problem der Energiespeicherung als auch das des Energietransports verspricht, ist die energetische Nutzung von Wasserstoff. Darüber hinaus bietet der Wasserstoff auch die Möglichkeit, in der **mobilen Energieanwendung**, also z.B. als Treibstoff für Automobile, eingesetzt zu werden. Insgesamt hat damit der Wasserstoff das theoretische Potential, das drängende Problem der Speicherung regenerativer Energien zu lösen und die erschöpflichen sowie umweltverschmutzenden fossilen Energieträger, vor allem Erdöl und Erdgas, zu substituieren.

„Das 'Erdöl' von morgen (ist) solarer Wasserstoff“ (Zitat Carl-Jochen Winter)

Vor allem könnten mit dem Energieträger Wasserstoff die drängenden Umweltprobleme entschärft werden:

Der Wasserstoff wird durch **elektrolytische Zerlegung** aus Wasser unter Verwendung regenerativer Energien dann und dort erzeugt werden, wo die regenerativen Energiequellen besonders ergiebig sind. Im Prinzip kann der Energieträger Wasserstoff aus allen Energiequellen gewonnen werden, die elektrische Energie liefern, also nicht nur aus Photovoltaik, sondern auch aus Windenergie oder Wasserkraft.

Die gewonnene Energiemenge ist im Wasserstoff gespeichert und wird per Tanker oder Pipeline (genau wie das Erdöl) dorthin transportiert, wo die Energie nachgefragt wird. Am Ort der Energieanwendung wird der Wasserstoff in Nutzenergie umgewandelt.

Die Luftschadstoffe der fossilen Energieanwendung entstehen erst gar nicht (mit Ausnahme geringer Mengen an NO<sub>x</sub>), insbesondere wird kein CO<sub>2</sub> emittiert. Wasserstoff ist der sauberste chemische Energieträger.

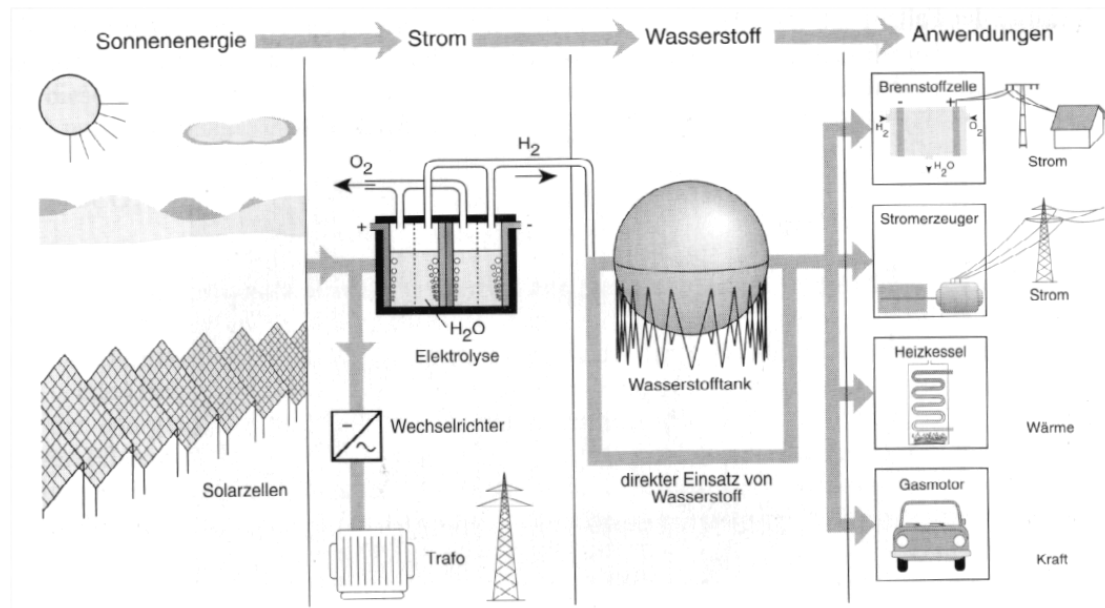


Abb.15: Die einzelnen Stationen der solaren Wasserstoff-Erzeugung und -Anwendung

In einem Projekt der Bayerwerke in Neunburg vorm Wald (Bayern) werden in einer Anlage im industriellen Maßstab alle Stationen einer solaren Wasserstoffwirtschaft unter einheimischen Klimabedingungen erprobt. Die Abbildung 15 zeigt die verschiedenen Stationen, die typisch für die verschiedenen Möglichkeiten des Energieträgers Wasserstoff sind: Zunächst wird per Photovoltaik elektrische Energie erzeugt, die zum Teil über Wechselrichter **direkt** in das Stromnetz **eingespeist** wird. Zum anderen wird mit solarem Strom Wasser, also  $H_2O$ , **elektrolytisch** in seine Bestandteile  $H_2$  und  $O_2$  **zerlegt**.

Der Energieträger  $H_2$  wird **gespeichert**. Dafür sind verschiedene Techniken in Erprobung. Will man große Energiemengen im Wasserstoff speichern, so benötigt man entweder großvolumige Tanks oder Behälter mit sehr hohen Drücken. Eine weitere Möglichkeit, die erforscht wird, ist deshalb auch die Speicherung von flüssigem Wasserstoff. Man benötigt dazu sehr gut isolierte Tanksysteme, da der Wasserstoff bei Atmosphärendruck eine Siedetemperatur von  $-253\text{ °C}$  besitzt.

Der Energieträger Wasserstoff schließlich kann auf vielfältige Weise in andere Energieformen umgewandelt werden:

- Er kann sehr schadstoffarm verbrannt und damit in Wärme umgewandelt werden. Bei dieser Verbrennung oxidiert der Wasserstoff mit dem Luftsauerstoff wieder zum Ausgangsprodukt Wasser.
- Mittels Gasmotoren kann der Wasserstoff auch in mechanische Energie (Kraft) umgesetzt werden.
- Und schließlich ist es möglich, den Wasserstoff in sogenannten **Brennstoffzellen** direkt, also ohne die Zwischenstufe Wärme, in elektrische Energie umzuwandeln, gewissermaßen als Umkehrung der Elektrolyse.

Daß die Wasserstoff-Energietechnik funktioniert, ist bereits an vielen realisierten Demonstrationsprojekten gezeigt worden: Viele Automobilfirmen haben bereits wasserstoffangetriebene Prototypen entwickelt. In Freiburg steht ein energieautarkes Haus, das solar erzeugten Wasserstoff für Energieanwendungen im Haushalt wie Kochen und Heizen benutzt und damit langanhaltende sonnenarme Zeiten überbrückt. Die Technik dafür ist noch in der Entwicklung und deshalb noch entsprechend teuer und großvolumig. Sicher wird es noch lange dauern, bis die Wasserstoff-Energiewirtschaft auf breiterer Basis Realität wird. Die prinzipielle technische Machbarkeit einer Wasserstoff-Wirtschaft ist weitgehend nachgewiesen, ob sie wirtschaftlich konkurrenzfähig werden kann, ist indes noch völlig offen. Wenn eine Wasserstoff-Energiewirtschaft auch noch mit vielen Fragezeichen versehen ist, so bietet sie doch eine Perspektive für eine umweltverträglichere Energieversorgung der Menschheit - und das ist nicht wenig.

## 2.4 Windkraft

### Windkraftanlagen

Die durch unterschiedlich starke Sonneneinstrahlung hervorgerufenen Temperaturunterschiede in der Atmosphäre führen zu Druckunterschieden. Die daraus resultierenden Luftströmungen, die Winde, sind eine alltägliche Erfahrung. Bereits im Altertum haben die Menschen diese regenerative Energiequelle genutzt. In den letzten Jahren erlebt die Stromerzeugung mit Windenergie nicht nur in Deutschland einen regelrechten Boom. Von Jahr zu Jahr werden mehr Windkraftanlagen errichtet. Dänemark beispielsweise möchte bis zum Jahr 2030 seinen Strombedarf zu 40% aus Windenergie gewinnen.

Da sich die Windenergie proportional zur 3. Potenz der Windgeschwindigkeit verhält, wächst auch die dem Wind entnehmbare Energie dementsprechend mit der Windgeschwindigkeit. Als Standorte für **Windkraftanlagen** kommen deshalb nur Regionen mit genügend hoher Windgeschwindigkeit in Frage. Die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit sollte deshalb mindestens etwa 4 m/s betragen. Das ist in den küstennahen Regionen und auf den Höhenzügen der Mittelgebirge der Fall.

Der Bau von Windkraftanlagen erfordert ein hohes technisches Niveau, da diese Anlagen sehr hohen Belastungen ausgesetzt sind. Derzeit setzen sich meist dreiflügelige Windkraftanlagen mit mittleren Leistungen von 400 bis 800 kW durch. Die entsprechenden Rotordurchmesser liegen zwischen 40 und 90 Meter.

Diese Windkraftanlagen erreichen Wirkungsgrade bis zu etwa 40 % (die theoretische Grenze liegt bei knapp 60 %).

Um die Leistung eines 500 MW-Kohlekraftwerks zu erbringen, müssten freilich rund 1000 mittlere Windkraftanlagen errichtet werden, die zudem während windschwacher Zeiten keine nennenswerten Energiebeiträge liefern können. Sie haben aber die unbestreitbaren Vorteile eines völlig emissionsfreien Betriebs und der Nutzung einer unerschöpflichen Energiequelle.

Das weltweite theoretische Potential der Windenergie ist relativ hoch, da etwa 2 % der eingestrahelten Sonnenleistung in Luftströmung umgesetzt werden. Da diese Energie aber sehr großvolumig verteilt ist, läßt sich allenfalls ein winziger Bruchteil nutzen. Hinzu kommt, daß man schon aus optischen Gründen nicht die gesamten Küstenregionen der Welt mit Windrädern zustellen kann.

Im Sinne einer CO<sub>2</sub>-Verminderungsstrategie sind die Beiträge der Windenergie sehr wertvoll. Nicht zuletzt deshalb wird die Windenergienutzung in Luxemburg und Deutschland finanziell gefördert.

Zum Jahresende 2015 waren weltweit Windkraftanlagen mit einer Leistung von 432 GW (gegenüber 94 GW 2006) installiert.

### Offshore-Anlagen

Unter Offshore-Anlagen versteht man Windkraftanlagen, die im Meer errichtet sind. Entsprechend bestehen Offshore-Windparks (Abb.16) aus mehreren im Meer errichteten Windkraftanlagen, entsprechend Windparks auf dem Festland.



Abb.16: Offshore-Windpark

Erste solcher Anlagen wurden Mitte der 90er Jahre gebaut, einige Offshore-Windparks wurden bereits in Dänemark, den Niederlanden und England errichtet. In Deutschland wurde 2007 der Bau von 14 Offshore-Windparks genehmigt, die ca. 35 km vom Festland entfernt sind.

Ursache sind zum einen die höheren Windgeschwindigkeiten auf hoher See, wo keine Hindernisse (Gebäude, Berge...) die Luft bremsen. Gegenüber vergleichbaren Windkraftanlagen auf dem Festland liefern Offshore-Anlagen über 20% mehr Leistung. Daneben gibt es hier keine Platzprobleme und keine Menschen, die sich durch Lärm, Schatten oder auch nur Aussehen von Windkraftanlagen belästigt fühlen.

Dem gegenüber müssen größere technische Probleme gemeistert werden. Die Windkraftanlagen müssen beispielsweise mit Spezial-Kranschiffen im Meeresboden fixiert werden. Es gibt auch Projekte von schwimmenden Windkraftanlagen, die nur über Seile am Meeresboden verankert sind.

Die Offshore-Anlagen liefern die elektrische Energie über Seekabel an die Küste, von wo aus sie in das öffentliche Hochspannungsnetz eingespeist werden.

Für alle Wartungsarbeiten und Reparaturen ist die Anfahrt eines Schiffes erforderlich. Neuere Anlagen besitzen einen Hubschrauberlandplatz.

Aufgrund des ohnehin höheren technischen Aufwandes werden Offshore-Anlagen eher größer gebaut als Windkraftanlagen auf dem Festland. Die in Deutschland geplanten Anlagen sollen Leistungen von 3 bis 6 MW haben. Die entsprechenden Rotorblätter müssen dafür Durchmesser von 90 bis 126 Meter haben.

#### **Aufgabe 4:**

- Wie hoch waren 2015 und 2018 in Luxemburg der Anteil der produzierten Windenergie am Stromverbrauch?
- Ab 2021 sollen über 15 Windparks in Luxemburg jährlich 1,44 PJ eingespeist werden. Wie hoch wäre dann der Anteil der produzierten elektrischen Energie am luxemburgischen Verbrauch (, legt man den heutigen Verbrauch zugrunde)?

#### **Aufgabe 5:**

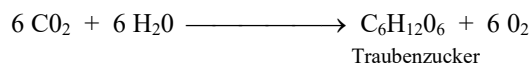
Eine Windkraftanlage mit einer Nennleistung (abgegebene elektrische Leistung) von 500 kW liefert im Jahr durchschnittlich 2500 Stunden elektrische Energie bei voller Leistung

- Wie groß ist der Jahresnutzungsgrad der Anlage?
- Wie viel kWh bzw. GWh elektrische Energie liefert die Anlage jährlich? Wie viel Geld zahlt die ENOVOS für diese Energie?
- Wie viel Tonnen Steinkohle müssen pro Jahr verbrannt werden, wenn das Kohlekraftwerk einen Wirkungsgrad von 40% hat?
- Wie viele Haushalte können mit Strom versorgt werden?

## **2.5 Biomasse**

Biomasse ist gespeicherte Sonnenenergie. Sie gehört zu den regenerativen Energiequellen, weil sie in überschaubaren Zeiträumen nachwächst, sich also erneuert.

Biomasse wird - ohne jedes Zutun des Menschen - beim Wachstum der Pflanzen aus den Grundstoffen des Lebens, nämlich Kohlendioxid und Wasser, unter Energiezufuhr gebildet. Die Energie für diese endotherme Reaktion liefert das Sonnenlicht. Dieser als **Fotosynthese** bekannte Prozess läuft nachfolgender Reaktionsgleichung ab:



Die Photosynthese bindet also Kohlendioxid aus der Atmosphäre und entläßt Sauerstoff dorthin. Nach dem Absterben der Biomasse läuft unter Freisetzung von Energie der umgekehrte Vorgang ab. Die Biomasse zersetzt sich bzw. verrottet, wobei das gebundene CO<sub>2</sub> unter Sauerstoffaufnahme wieder freigesetzt wird. Das Gleiche passiert beim Verbrennen der Biomasse. Demnach wird bei der energetischen Nutzung von Biomasse gerade so viel CO<sub>2</sub> freigesetzt, wie zum Wachsen dieser Pflanze gebunden und damit aufgenommen wurde. Demzufolge ist die energetische Nutzung von Biomasse CO<sub>2</sub>-neutral, wenn man nicht mehr Biomasse verbrennt, als nachwächst. Eine Nutzung von Biomasse ist - im Gegensatz zur Verbrennung fossiler Energieträger - klimaschädlich. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber den anderen regenerativen Energien ist die von der Natur selbst bereits vorgenommene Speicherung des Sonnenlichts in der Biomasse. Die Nutzung der Biomasse ist deshalb ohne zusätzliche teure Speichersysteme dem Bedarf entsprechend einsetzbar.

### **Was ist Biomasse?**

Biomasse ist der Oberbegriff für alle Substanzen, Abfallstoffe und Rückstände von Pflanzen und Lebewesen. Konkret versteht man darunter Holz (wichtigster Energieträger vor dem Zeitalter der fossilen Brennstoffe), Stroh, schnell wachsende Pflanzen und Algen einerseits sowie tierische und menschliche Exkremete, Klärschlämme und organische Abfälle andererseits.

Die energetischen Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse sind sehr vielfältig, wie Abb.17 zeigt.

<b>Biomasse</b>	Holz, Stroh, Hausmüll	Gülle, Mist	Zucker- und stärkehaltige Pflanzen	Ölhaltige Pflanzen	Schnell wachsende Pflanzen
<b>Umwandlungsverfahren</b>	Direkte Verbrennung oder Verschwelung	Faulung oder biologische Oxidation	Vergärung	Auspressen	Verbrennung
<b>Energieträger</b>	Heizgas oder Schwelgas	Biogas oder Wärme		Pflanzenöl, Biodiesel	Heizwärme
<b>Nutzenergie</b>	Wärme, (Kraft)	Wärme	Kraft	Kraft	Wärme

Abb.17: Energetische Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse

Das theoretische Potential der Biomasse ist sehr hoch, da jährlich rund 150 Mrd. Tonnen Biomasse gebildet werden. Davon kann allerdings nur ein geringer Teil technisch genutzt werden. Der großflächige Anbau von Energiepflanzen, beispielsweise von chinesischem Schilfgras, in sogenannten Energiefarmen würde landwirtschaftlich genutzte Flächen in Anspruch nehmen und riesige Monokulturen zur Folge haben, die auch ökologisch bedenklich sind. Hingegen ist die bessere energetische Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe wie Stroh und Holz sicherlich eine sehr sinnvolle Maßnahme. Auch die Nutzung von Deponiegasen, Klärgasen und Biogas in Blockheizkraftwerken wird in Deutschland weiter intensiviert werden. Schließlich bieten bäuerliche Genossenschaften zunehmend Biodiesel an, der aus ölhaltigen Pflanzen gewonnen wird.

All diese Verfahren zeigen, daß die energetische Nutzung von Biomasse eine sehr vielfältige, von örtlichen Gegebenheiten abhängige Struktur besitzt, die sich in Zukunft weiter ausdifferenzieren wird. Die Biomasse steht bei vielen Verfahren an der Schwelle der Wirtschaftlichkeit, so daß in naher Zukunft ein deutlich höherer Anteil der Biomasse an der Energieversorgung erwartet werden kann.

## 2.6 Sonstige

### Wasserkraft

Die Wasserkraft ist, wie die Windkraft auch, bereits von der Natur in mechanische Energie umgewandelte Sonnenenergie. Im Gegensatz zur Windenergie ist die mechanische Energie des Wassers stark konzentriert. Das erleichtert ihre technische Nutzung zu wirtschaftlichen Bedingungen erheblich. So ist es nur folgerichtig, daß die Wasserkraft die bedeutendste kommerziell genutzte regenerative Energie ist.

Die Potentiale an Wasserkraft sind in Deutschland nahezu ausgeschöpft. Sie trägt mit rund 20 TWh/a erzeugter elektrischer Energie etwa 5 % zur Stromerzeugung in Deutschland bei. Weltweit sind noch große ungenutzte Potentiale an Wasserkraft vorhanden. Trotz der sauberen Energieerzeugung darf nicht übersehen werden, daß Wasserkraftwerke oft erhebliche Eingriffe in die Natur darstellen und daß deshalb ihr weiterer Zubau gründlich abgewogen werden muß.

Die Wasserkraftwerke nutzen die mechanische Energie der Binnengewässer, wobei zwischen Laufwasserkraftwerken sowie Speicher- und Pumpkraftwerken zu unterscheiden ist. Die Turbinen der Wasserkraftwerke wandeln die kinetische Energie des durchströmenden Wassers in Rotationsenergie um, mit der dann ein Generator angetrieben wird. Aufgrund der hohen Energiedichte werden Umwandlungswirkungsgrade bis zu 90 % erreicht.

Im Gegensatz zur oben dargestellten Wasserkraftnutzung kommt der Nutzung der Meeresenergie bislang keine größere Bedeutung zu.

Allerdings gibt es seit 2016 ein Gezeitenkraftwerk Meerenge zwischen der schottischen Nordküste und den Orkney-Inseln, das nach permanent vergrößert wird. 3-rotorige „Windmühlen“ mit einer Leistung von 1,5 MW sind auf dem Meeresboden fixiert und drehen sich entsprechend der Strömung. Sie produzieren jährlich jeweils ca. 18 TJ.

Es sollen insgesamt 400 MW installiert werden, womit das Kraftwerk weltweit das größte seiner Art wäre.



## Müllverbrennung

Die Müllverbrennung ist nicht eigentlich eine regenerative Energiequelle, sie wird trotzdem mit aufgenommen, weil sich der anfallende Müll sozusagen auch ständig erneuert und nicht gänzlich vermieden werden kann. Die Verbrennung von Müll ist selbstverständlich auch nicht CO<sub>2</sub>-neutral. Gerade die unkontrollierte Zusammensetzung des Mülls erfordert eine aufwendige Verbrennungs- und Filtertechnik, um die Emission toxischer Stoffe wie Dioxine, Furane, Schwermetalle u. a. unter den vorgegebenen Grenzwerten zu halten.

In Müllverbrennungsanlagen wird zumeist Strom und Fernwärme erzeugt. Die Müllverbrennung trägt derzeit weniger als 1 % zur öffentlichen Stromerzeugung bei.

## Geothermie

Im heißen Kern der Erde ist eine große Menge Wärmeenergie mit einer Temperatur von ca. 3000 K gespeichert, von deren Potential wir uns bei Vulkanausbrüchen überzeugen können. Leider ist diese Energie schwer anzupapfen, so daß sie bisher nur dort im größeren Stil genutzt werden kann, wo geothermische Anomalien vorliegen. In Europa ist das hauptsächlich in Island und in Oberitalien der Fall. Dort steigt in porösen Gesteinsformationen heißes Wasser oder Dampf von selbst nach oben und kann für Heizzwecke und auch zum Teil zur Stromerzeugung genutzt werden.

In Luxemburg und Deutschland wird die Geothermie - auch in absehbarer Zukunft - keinen nennenswerten Beitrag zur Energieversorgung leisten können, von einigen lokalen Nutzungsmöglichkeiten abgesehen.

## Umgebungswärme

Die in Luft, Wasser und Boden gespeicherte Wärme, die Umgebungswärme, stellt ein riesiges Energiepotential auf niedrigem Temperaturniveau dar. Um es für Energieanwendungen, insbesondere zu Heizzwecken, nutzbar machen zu können, muß das Temperaturniveau angehoben werden. Das geschieht technisch mittels Wärmepumpen.

## 2.7 Ausblick

### Aufgabe 6:

Welche Möglichkeiten der Stromproduktion haben wir? Vervollständige nachfolgende Tabelle (Abb.18) und dann erhältst Du einen kleinen Überblick über derzeit vorhandene und mögliche Stromerzeuger.

Anlage: (Allgemein oder Beispiel)	Leistung:	Energie: (jährliche Produktion)	Anmerkung: (Name, Standort oder Informationen)
Photovoltaik-Anlage	4 kW = ..... MW	..... kWh = ..... GWh	Privathaus (Sonneneinstrahlung in Deutschland berücksichtigen)
Solarfarm (Méés)	90 MW	50 GWh	2011 größte Anlage in F
Rinnenkollektoranlage	49,9 MW	157 GWh	Andasol 1 (E)
Solarturmkraftwerk	11 MW	23 GWh	PS10 (Fa. ABENGOA) (E)
Windkraftanlage	600 kW = ..... MW	..... kWh = ..... GWh	Remerschen, (Energie entspr. min. 1500 h Maximalleistung)
Windpark	38 x ... MW = 62,7 MW	..... GWh	Klettwitz (D) (Energie entspr. 1754 h Maximalleistung)
Off-Shore-Windpark	20 x ... MW = ..... MW	90 GWh	Middelgrunden (DK) (Leistung entspr. 2250 h Maximalleistung)
Kohlekraftwerk	10 x 550 MW = ..... MW	... TWh = ..... GWh	Taichung Power Plant (Taiwan) (Energie bei 81,31% Auslastung)
Atomkraftwerk	4 x ... MW = ..... MW	35,2 TWh = ..... GWh	Cattenom (F) (Leistung bei 77,22% Auslastung)

Abb.18: Elektrische Stromerzeuger

Die Situation der Nutzung regenerativer Energieträger ergibt ein vielschichtiges Bild. Wegen der einseitigen Ausrichtung der Energietechnik in den zurückliegenden Jahrzehnten auf fossile und nukleare Energieträger kommt die technische Entwicklung der Wandler- und Speichersysteme für regenerative Energien erst allmählich in Gang. Es ist noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten. Deshalb ist es auch nicht verwunderlich, daß die Nutzung regenerativer Energien in der Regel gegenüber der konventionellen Energiewirtschaft (noch) nicht konkurrenzfähig ist, natürlich auch deshalb, weil die Umweltschäden, welche durch die konventionellen Techniken verursacht werden, nicht in die Kostenrechnungen eingehen.

### **Nutzbare Potentiale regenerativer Energien**

Die drohende Klimakatastrophe macht deutlich, daß die Menschheit die Deckung ihres Energiebedarfs auf eine breitere und vor allem umweltfreundlichere Basis stellen muss. Deshalb ist die verstärkte Nutzung regenerativer Energien, die ohnehin umgesetzt werden, ein wichtiges Ziel für die Zukunft.

Außer bei der Wasserkraft und Müllverbrennung sind bei allen regenerativen Energiequellen noch erhebliche technische Potentiale vorhanden. Was deren wirtschaftliche Nutzungen anbelangt, so sind sie bei den gegenwärtig niedrigen Energiepreisen uninteressant. Lediglich der Biomasse wird ein größerer Beitrag zur Energieversorgung zugeschrieben.

Neuere Energieprognosen gehen unter optimistischen Annahmen davon aus, daß die regenerativen Energieträger ab dem Jahr 2010 in Deutschland einen jährlichen Beitrag zum Primärenergiebedarf von bis zu 10 % erreichen können.

Den Vorteilen der Nutzung regenerativer Energieträger, ihre vergleichsweise gute Umweltverträglichkeit und ihre Unerschöpflichkeit, stehen die Nachteile der geringen Energiedichte, des intermittierenden Energieangebotes und der zeitlichen Diskrepanz zwischen dem Energieangebot und dem Energiebedarf gegenüber. Deshalb werden die regenerativen Energieträger zu einer anderen Struktur der Energiewirtschaft führen. Nicht die zentrale Energieversorgung mit großtechnischen Wandler- und überregionalen Verteilungssystemen wird die regenerativen Energiequellen in großem Stile nutzen, sondern viele kleine, dezentrale Einheiten werden das Bild der regenerativen Energienutzung bestimmen. Dabei sind eine vielfältige, bunte Mischung und regionale Differenzierung verschiedenster Systeme zu erwarten. Der Einzelne wird sich wieder stärker mit seiner Energieversorgung befassen und dazu beitragen. Im übertragenen Sinn könnte man sagen, der „Strom“ kommt zukünftig nicht mehr nur aus der Steckdose.

## IV Elektrizitätslehre

### A Wiederholung

#### 1 Ohm'sches Gesetz

Ohm <sup>1)</sup>

#### 2 Grundeigenschaften von Parallel- und Serienschaltung

##### 2.1 Parallelschaltung

##### 2.2 Serienschaltung

### 3 Reale Spannungsquelle

Die Spannung, die an einer Spannungsquelle anliegt, ändert sich, wenn ein Verbraucher angeschlossen ist. Dies liegt am Innenwiderstand der realen Spannungsquelle.

Zum Ermitteln der Spannungsdifferenz zwischen einer unbelasteten (Abb.1) und einer belasteten (Abb.2) Spannungsquelle betrachten wir beide Stromkreise.

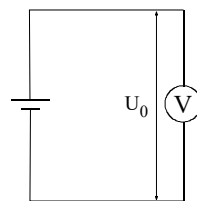


Abb.1: Spannungsquelle ohne Verbraucher

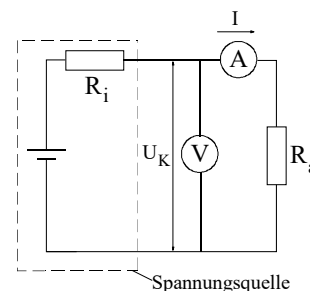


Abb.2: Stromkreis mit Verbraucher

<sup>1)</sup> Georg Simon OHM (1789 -1854), deutscher Physiker, zahlreiche Schriften, insbes. „Die galvanische Kette mathematisch bearbeitet“ (großen Einfluss auf theoretische und praktische Entwicklung der Elektrizität)



Die **Quellenspannung** der unbelasteten Spannungsquelle bezeichnen wir mit  $U_0$ , die **Klemmspannung** an der belasteten Spannungsquelle mit  $U_K$ .

Im belasteten Stromkreis misst man an den Klemmen der Spannungsquelle:

$$U_K = R_a \cdot I \quad (1)$$

Des Weiteren gilt:

$$U_0 = (R_a + R_i) \cdot I \quad (2)$$

Aus Gl.(1) und Gl.(2) berechnet man:

$$U_0 - U_K = (R_a + R_i) \cdot I - R_a \cdot I$$

$$\boxed{U_0 - U_K = R_i \cdot I}$$

Man erkennt:

Der **Spannungsabfall** an einer realen Spannungsquelle ist um so **größer**, je größer der **Innenwiderstand** und die **Stromstärke** sind.

### Aufgabe 1:

- Wie groß ist der Gesamtwiderstand einer Schaltung, bei der 1 Widerstand von  $100 \Omega$  und 1 Widerstand von  $200 \Omega$  bei einer Spannung von  $100 \text{ V}$  parallel geschaltet sind? Welcher Strom fließt durch jeden Widerstand?
- Wie groß wäre der Gesamtwiderstand bei hintereinander geschalteten Widerständen? Welcher Strom fließt dann durch jeden Widerstand?

### Aufgabe 2:

Die Spannung an der Batterie einer Taschenlampe wird mit einem Spannungsmesser ( $R = 4 \text{ k}\Omega$ ) mit  $14,4 \text{ V}$  gemessen. Im Betrieb fließt ein Strom von  $0,25 \text{ A}$  durch die Lampe und die Spannung fällt auf  $13,8 \text{ V}$ .

- Wie groß ist der Innenwiderstand der Batterie?
- Wie groß ist der Widerstand der Lampe?
- Vergleiche den Widerstand der Lampe mit dem des Spannungsmessers. Was kannst du daraus über die Stromstärken durch die Lampe bzw. den Spannungsmesser schließen (Verhältnis)?

# B Kondensator

## 1 Elektrische Feldstärke

Die **elektrische Feldstärke E** gibt an, wie groß die Kraft auf einen elektrisch geladenen Probekörper im elektrischen Feld ist.

$$E = \frac{F}{Q}$$

E: Elektrische Feldstärke in V/m  
 F: Kraft auf einen Körper in N  
 Q: Ladung des Körpers in C (= Coulomb <sup>1)</sup>)  
 1 C = As

Beispiel	Elektrische Feldstärke in V/m
Stromdurchflossener Kupferdraht (1 mm <sup>2</sup> ) bei 6 A	0,1
Leuchtstofflampe (eingeschaltet)	5 · 10 <sup>1</sup>
Kohlelichtbogen	5 · 10 <sup>3</sup>
Luft bei Gewitter	10 <sup>6</sup>
Dielektrikum eines Elektrolytkondensators	10 <sup>10</sup>

Abb.1: Beispiele elektrische Feldstärke

## 2 Kapazität

Ein Kondensator dient zum Speichern elektrischer Energie. Mit dieser können beispielsweise eine pulsierende Gleichspannung geglättet oder Vorgänge in elektronischen Schaltungen zeitlich verzögert werden.

Bei einem an eine Spannungsquelle angeschlossenen Kondensator (Abb.1) sammeln sich zunächst elektrische Ladungen, bis der Kondensator ganz aufgeladen ist.

Betätigt man den Umschalter, misst man am Strommessgerät einen kurzzeitigen Stromfluss. Der Kondensator hat sich entladen.

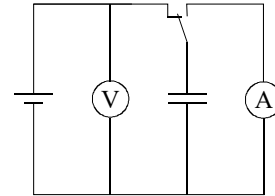


Abb.1: Kondensatorschaltung

Die **Kapazität C** eines Kondensators ist das Maß für seine **Speicherfähigkeit** an elektrischer Energie

$$C = \frac{Q}{U}$$

C: Kapazität in F (Farad <sup>2)</sup>)  
 1 F = 1 C/V = 1 A · s/V  
 Q: gespeicherte Ladung in C  
 U: Spannung in V

**Umrechnung:**

1F = 10<sup>12</sup> pF (Pikofarad)

## 3 Plattenkondensator

Abb.2: Plattenkondensator

**Kapazität C** eines Plattenkondensators

$$C = \epsilon_{rel} \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{s}$$

C: Kapazität in F  
 $\epsilon_{rel}$ : Dielektrizitätszahl (ohne Einheit)  
 $\epsilon_0$ : elektrische Feldkonstante  
 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s}/(\text{V} \cdot \text{m})$   
 A: Plattenoberfläche (wirksame O.) in m<sup>2</sup>  
 s: Plattenabstand in m

<sup>1)</sup> Charles Augustin DE COULOMB (1736-1806), französischer Physiker (angewandte Mechanik, Elektrizitätslehre und Magnetismus), Gesetz von Coulomb (Anziehung zw. Ladungen)

<sup>2)</sup> benannt nach Michael FARADAY (1791 - 1867), englischer Physiker und Chemiker, Grundgesetze der Elektrolyse (Faradaysche Gesetze), Faradayscher Käfig



Die Dielektrizitätszahl (Abb.3) ist eine Materialeigenschaft.

*Abb.3: Dielektrizitätszahl verschiedener Stoffe*

Dielektrikum	Dielektrizitätszahl $\epsilon_{\text{rel}}$ (o. Ein.)
Luft	1,0
Papier	1,2 – 3,0
Ölpapier	5,0
Kunststoff Kerafar	19,0 – 64,0
Spezielle keramische Stoffe	100 – 10 000

Die **elektrische Feldstärke** eines Plattenkondensators beträgt:

$$E = \frac{U}{s}$$

## 4 Arbeit

Die Arbeit zum Laden eines Kondensators ergibt sich einfach aus einem Ladungs-Spannungs-Diagramm (Abb.4).



*Abb.4: Laden eines Kondensators*

### Aufgabe 1:

Die Platten eines Plattenkondensators haben einen Durchmesser von 25,5 cm, der Plattenabstand beträgt 10 mm. Zwischen den Platten befindet sich Luft.

- Wie groß ist die Kapazität des Kondensators?
- Wie kann man mit diesem Kondensator eine Kapazität von 1000 pF erreichen?

### Aufgabe2:

- Welche Ladung nimmt eine Schaltung auf, bei der 2 Kondensatoren von 40  $\mu\text{F}$  bei einer Spannung von 100 V parallel geschaltet sind? Zeichne zunächst den Schaltkreis mit einer Spannungsmessung an den Kondensatoren.
- Wie groß wäre die Ladung bei in Reihe geschalteten Kondensatoren? Zeichne wiederum zunächst den Schaltkreis.  
Hinweis: Die Teilladung an jedem Kondensator ist gleich und entspricht der Gesamtladung
- Berechne aus den Gesamtladungen jeweils die Gesamtkapazität der Schaltung.
- Wie verhalten sich Gesamtladung und Gesamtkapazität mehrerer Kondensatoren bei Reihen- bzw. Parallelschaltung? Schreibe die vier Berechnungsformeln hin.

	Parallelschaltung	Reihenschaltung
Gesamtladung		
Gesamtkapazität		

(Die Parallelschaltung führt zu einer Vergrößerung der Kapazität, so als würde die Plattenoberfläche A vergrößert).

(Die Reihenschaltung führt zu einer Verringerung der Kapazität, so als würde der Abstand  $s$  zwischen den Kondensatorflächen vergrößert).

### Aufgabe 3:

Die horizontal angeordneten Platten eines Plattenkondensators haben einen Abstand von 12 cm. Ein Körper der Ladung  $0,9 \cdot 10^{-5} \text{ C}$  mit Masse 1,8 g befindet sich im elektrischen Feld des Kondensators in der Schwebelage.

Wie groß ist die anliegende Spannung? (Überlege zunächst welche Kräfte wirken.)



## 5 Aus Wissenschaft und Technik

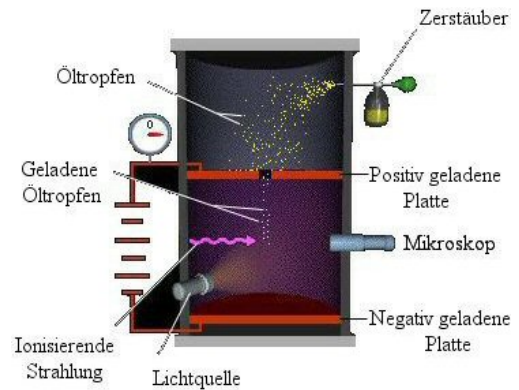
### Elektrische Elementarladung:

Robert Andrews MILLIKAN <sup>1)</sup> gelang es als Erstem, kleinste Elektrizitätsmengen nachzuweisen. Er hielt hierzu fein zerstäubte Öltröpfchen zwischen einem horizontal angeordneten Plattenkondensator in die Schwebe (Abb.5). Aus der erforderlichen elektrischen Spannung und der Gewichtskraft berechnete er die elektrische Ladung der Öltröpfchen:

$$Q = m \cdot g \cdot s / U$$

Er fand heraus, dass die Ladungen immer ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  waren.

Abb.5: Anordnung Millikan-Versuch

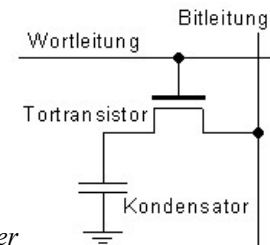


### DRAM (DynamikRAM):

DRAM sind einfache, aber langsame Speicherbausteine. Jedes Bit wird durch die Ladung eines Kondensators (Abb.6) gespeichert. Da dieser sich durch Kriechströme entlädt, muss der Speicherinhalt immer wieder aktualisiert werden („refresh“), dies bis zu 1000 Mal pro Sekunde.

Das Lesen und Schreiben erfolgt über einen Transistor als Schalter: er isoliert die Ladung des Kondensators oder gibt sie auf die Bitleitung frei.

Abb.6: Kondensator als Bit-Speicher



---

<sup>1)</sup> Robert Andrews MILLIKAN (1868-1953), amerikanischer Wissenschaftler, Nobelpreis der Physik 1923 für Arbeiten an Elementarladungen und Photoeffekt





## C Elektromagnetismus

### 1 Magnetischer Fluss

Durch elektrischen Strom erzeugten Magnetismus nennt man Elektromagnetismus.

#### 1.1 Magnetisches Feld eines geraden Leiters

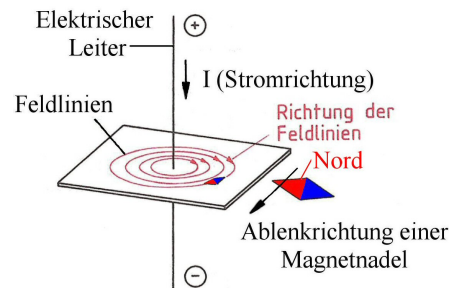


Abb.1: Gerader Leiter

Ein vom Strom durchflossener Leiter (Abb.1) erzeugt ein Magnetfeld.

Dessen Feldlinien verlaufen rechtsdrehend konzentrisch zum Leiter und werden mit zunehmender Entfernung zum Leiter schwächer.

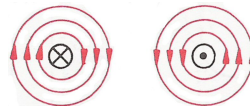


Abb.2: Rechtsdrehende Feldlinien

Ein Kreuz im Leitungsquerschnitt (Abb.2) stellt dar, daß der Strom vom Betrachter wegfließt.

#### 1.2 Magnetisches Feld einer Spule

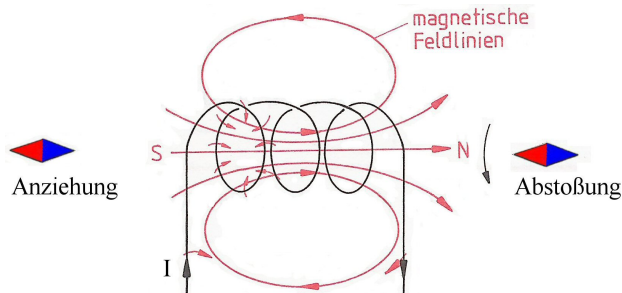


Abb.3: Spule

Eine vom Strom durchflossene Spule (Abb.3) erzeugt ein ähnliches Magnetfeld wie ein Stabmagnet. (Abb.4 und 5).

Sie bildet einen magnetischen Nord- und Südpol.

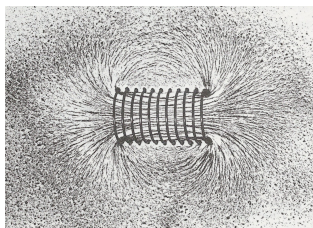


Abb.4: Magnetische Feldlinien einer Spule

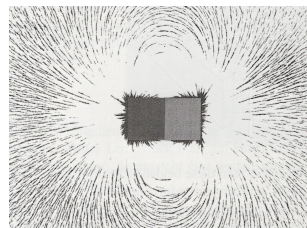


Abb.5: Magnetische Feldlinien eines Stabmagneten

#### Aufgabe:

Erkläre die Richtung der Feldlinien in einer Spule.

### 1.3 Magnetische Flussdichte

Die Stärke eines magnetischen Feldes wird durch die **magnetische Flussdichte B** (auch als **Induktion** bezeichnet) beschrieben.

Sie ist eine vektorielle Größe und hat die gleiche Richtung wie die Feldlinien.

**Magnetische Flussdichte B**  
im Inneren  
einer Spule

$$\mathbf{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{\mathbf{I} \cdot \mathbf{N}}{\mathbf{l}}$$

B: Magnetische Flussdichte in T (Tesla<sup>1</sup>) 1 T = 1 V·s/m<sup>2</sup>

$\mu_r$ : Permeabilitätszahl (ohne Einheit)

$\mu_0$ : magnetische Feldkonstante

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ V}\cdot\text{s}/(\text{A}\cdot\text{m}) (= 0,4 \cdot \Pi \cdot 10^{-6} \text{ V}\cdot\text{s}/(\text{A}\cdot\text{m}))$$

I: Stromstärke in A

N: Anzahl der Windungen (ohne Einheit)

l: Länge der Spule in m

Die Permeabilitätszahl ist eine Stoffkonstante. Sie berücksichtigt daß sich im Inneren der Spule ein Stoff (und kein Vakuum) befindet.

Die Permeabilitätszahl ist vom Stoff, der Stärke des Magnetfeldes und der Temperatur abhängig.

Spulen haben daher häufig einen Eisenkern, durch den die Flussdichte beispielsweise 50fach verstärkt wird.

### 1.4 Definition

Der **magnetische Fluss** gibt an, wie groß der Magnetismus ist, der eine Fläche durchsetzt.

**Magnetischer Fluss**

$$\Phi = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$$

$\Phi$ : Magnetischer Fluss in Wb (Weber<sup>2</sup>)

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T}\cdot\text{m}^2 = 1 \text{ V}\cdot\text{s}$$

A: vom magnetischen Fluss durchsetzter Fläche in m<sup>2</sup>

B: magnetische Flussdichte senkrecht zur Fläche in T

### 1.5 Aus Wissenschaft und Technik

#### Magnetfelder der Erde/Plasmakammer:

Die Erde ist von einem Magnetfeld umgeben, dessen Pole in der Nähe der geografischen Pole der Erde sind. Die magnetische Flussdichte in Luxemburg beträgt ca.  $2 \cdot 10^{-5}$  T.

Im Vergleich dazu erzeugen Elektromagnete in der Kernfusionsforschung bis zu 10 T starke Flussdichten.

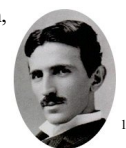
Die Abb.6 zeigt die bizarr geformte, 5 to schwere Plasmakammer, die das 1. Anlagenteil einer Kernfusionsanlage ist, in der seit 2015 Wasserstoff-Plasma hergestellt wird. Ein 3 T starkes Magnetfeld hält die geladenen Teilchen im Inneren der Plasmakammer, damit die erforderlichen hohen Temperaturen (100 Millionen °C) erzeugt werden können.



Abb.6: Plasmakammer Wendelstein 7-X (2005 erstellt)

<sup>1</sup>) Nikola TESLA (1856-1943), amerikanischer (geboren im damaligen Kaisertum Österreich, heute Kroatien) Erfinder, Physiker, Maschinenbau- und Elektroingenieur. Unzählige Patente und theoretische Arbeiten im Bereich der Stromversorgung

<sup>2</sup>) Wilhelm Eduard WEBER (1804-1891), deutscher Physiker (Magnetismus, Elektrizität)



<sup>1</sup>)

<sup>2</sup>)

**Teilchenbeschleuniger:**

Man erhält sehr energiereiche Elementarteilchen (z.B. Elektronen oder Protonen), indem diese in Teilchenbeschleunigern auf hohe kinetische Energie gebracht werden. Dabei halten Elektromagnete die Teilchen auf ihrer Kreisbahn, die diese tausenden Male umlaufen, bis die Geschwindigkeit hoch genug ist.

Am Teilchenbeschleuniger (Abb.7) des 1954 gegründeten CERN wird in Genf Kernforschung betrieben.



Abb.7: Teilchenbeschleuniger

**2 Elektromotorisches Prinzip****2.1 Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld**

Eine Leiterschaukel ist ein stromdurchflossener Leiter, der an zwei Metallbändern schwingen kann. Diese wird mittig zwischen die Schenkel eines Hufeisenmagneten gehängt (Abb.1).

Man beobachtet, dass eine Kraft auf den Schaukelsteg wirkt. Je nach Stromrichtung und Orientierung der Magnetpole wird der Steg nach innen oder außen abgelenkt.

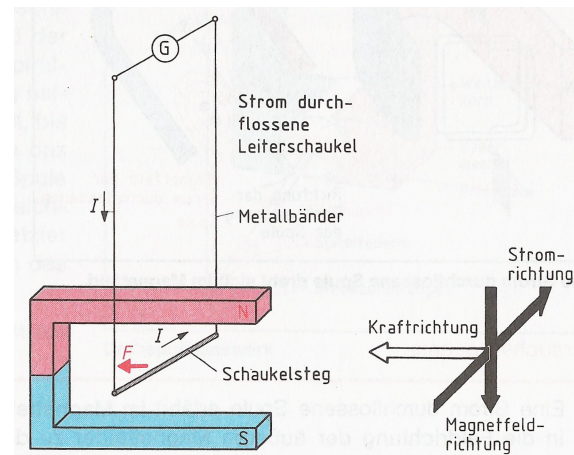


Abb.1: Leiterschaukel im Magnetfeld

**Erklärung:**

Der Stromfluss im Schaukelsteg bildet ein Magnetfeld. In Stromrichtung ist es rechtsdrehend um den Leiter. Durch die Überlagerung mit dem Magnetfeld des Dauermagneten werden die Feldlinien auf der einen Seite des Steges verstärkt (z.B. rechts in Abb.2) und auf der anderen Seite geschwächt.

Daraus entsteht eine Kraft  $F$ , die den Schaukelsteg von der Feldverstärkung zur Feldschwächung bewegt.

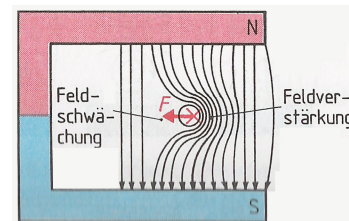


Abb.2 :Kraft

Die ablenkende Kraft wird bei Elektromessgeräten und Elektromotoren ausgenutzt.

Wenn ein **stromdurchflossener Leiter** sich in einem **Magnetfeld** befindet, wird elektrische Energie in **mechanische Energie** umgewandelt.

## 2.2 Gleichstrommotor

Elektromotoren sind Maschinen, die aufgrund der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes elektrische Energie in mechanische Energie umwandeln.

### Aufbau:

Eine einfache Bauform des Elektromotors besteht aus einer Strom durchflossenen Spule und zwei Feldmagneten (Dauer- oder Permanentmagneten).

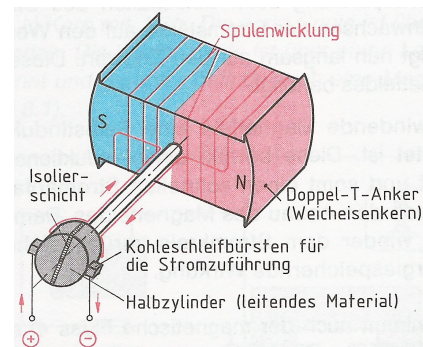
Zur Verstärkung der magnetischen Feldlinien der **Spule** ist diese um einen Weicheisenkern **gewickelt**. Dieses Bauteil (Abb.3) bezeichnet man als **Anker** oder **Rotor**.

Der Anker ist mit einer Achse am **Kollektor** oder **Kommutator** befestigt. Dieser besteht aus zwei Halbzylindern, die durch eine Isolierschicht getrennt sind. Die beiden Enden der Spule sind mit je einem der Halbzylinder verbunden.

Die Stromzuführung erfolgt über Schleifkontakte, die **Kohleschleifbürsten**, an denen die Halbzylinder entlang schleifen.

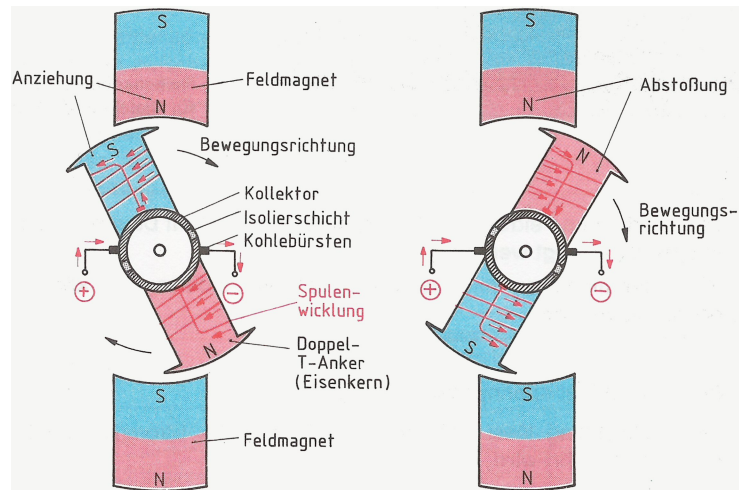
*Abb.3: Anker mit Kollektor und Kohleschleifbürsten*

Die feststehenden Dauermagnete bezeichnet man als **Stator**.



### Funktionsweise:

Bei Stromzufuhr bildet die Spule des Ankers ein Magnetfeld. Durch die Anziehung zwischen den magnetischen Feldlinien des Ankers und des Stators beginnt sich der Anker zu drehen (Abb.4a). In der Position wo sich die beiden entgegengesetzten Pole gegenüber stehen ist die Anziehung am größten. Hier wird nun - durch den Kollektor - die Stromrichtung durch den Anker geändert. Das Magnetfeld des Ankers wird dadurch umgepolt. Die gleichen Pole von Anker und Stator stoßen sich ab (Abb.4b) und der Anker dreht weiter.



*Abb.4a und b: Anziehung bzw. Abstoßung von Anker und Stator*

Bei technischen Motoren besitzen die Anker mehrere gegeneinander versetzte Wicklungen, damit nur eine Windungsfläche im toten Punkt ist.

Die Dauermagnete werden dabei oft durch Elektromagnete ersetzt.

## 2.3 Aus Wissenschaft und Technik

### Elektromotor:

Elektromotor (Abb.5) mit Anker und Stator mit mehreren Spulen.



*Abb.5: Elektromotor*

# V Chemie

## A Elektrochemie

### 1 Redoxreaktionen

#### 1.1 Der Redoxbegriff

Redoxreaktionen sind Reaktionen, bei denen **Oxidation (Elektronenabgabe)** und **Reduktion (Elektronenaufnahme)** miteinander gekoppelt ablaufen.

Aufgrund dieser Definition sind auch Reaktionen, bei denen Sauerstoff nicht beteiligt ist, mit klassischen Oxidationen vergleichbar. So wird beispielsweise bei der Herstellung von Platinen Kupfer zwischen den Leitungsbahnen weggeätzt.

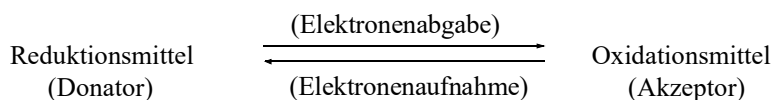
**Beispiel:**

Reaktion zwischen Magnesium und Sauerstoff

Entsprechend müssen die Begriffe Oxidations- bzw. Reduktionsmittel folgendermaßen definiert werden:

Das **Oxidationsmittel** ist ein **Elektronenakzeptor**.  
Das **Reduktionsmittel** ist ein **Elektronendonator**.

Auch Redoxvorgänge lassen sich somit auf Donator-Akzeptor-Prozesse zurückführen:



Hinweis zum Kapitel „Elektrochemie“:

Auszüge aus Liening, Quante, Thomas, Wittke:  
Lehrbuch der Chemie SII  
Struktur und chemische Bindung Elektrochemie  
Diesterweg 5082  
ISBN 3-425-05082-6



## 1.2 Oxidationszahlen

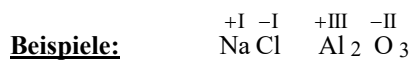
### 1.2.1 Begriffe und Erklärungen

Zum besseren Verständnis komplizierter Redoxreaktionen ist es sinnvoll, den Hilfsbegriff der Oxidationszahl einzuführen:

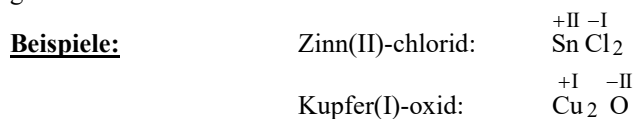
Die **Oxidationszahl** macht Aussagen über die Elektronenbilanz eines Atoms bei Redoxreaktionen.

#### • Ionenverbindungen

Die Oxidationszahl lässt sich auf Ionenverbindungen direkt anwenden: Sie ist gleich der Ionenladung und entspricht der Anzahl von gegenüber dem elementaren Zustand aufgenommenen bzw. abgegebenen Elektronen. Man schreibt meist die Oxidationszahlen in römischen Ziffern (Unterscheidung gegenüber Ionen-Ladung) über das entsprechende Elementsymbol, und zwar mit der Ladung (+ bzw. -) voran und immer bezogen auf ein Atom bzw. Ion.



Bei der Benennung von Verbindungen wird die Oxidationszahl in Klammern hinter das entsprechende Element gesetzt.

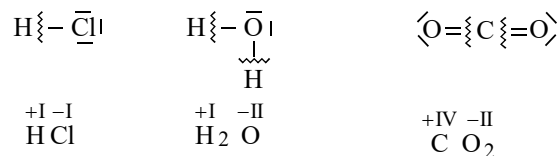


#### • Molekülverbindungen

Auch auf Molekülverbindungen lässt sich die Oxidationszahl anwenden: man denkt sich die Moleküle in Ionen aufgetrennt, wobei das bindende Elektronenpaar (die bindenden Elektronenpaare) dem elektronegativeren Element zugeteilt wird (werden).

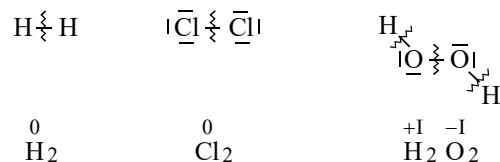
Die Oxidationszahl ist die Ionenladung, die diese gedachten, aber nicht tatsächlich existierenden Ionen tragen würden.

#### Beispiele:



Bei Bindungen zwischen gleichartigen Atomen erhalten beide Atome für die Berechnung der Oxidationszahl je ein Elektron der Bindung.

#### Beispiele:



#### • Elementare Stoffe

Die Atome elementarer Stoffe besitzen sinnentsprechend die Oxidationszahl 0.

#### • Anmerkung

Die Atome eines Elements können entsprechend der unterschiedlichen Bindungspartner verschiedene Oxidationszahlen annehmen.



### 1.2.2 Regeln zur Bestimmung der Oxidationszahlen

Aus den aufgeführten Überlegungen lassen sich Regeln ableiten, nach denen die Oxidationszahlen errechnet werden können. Dabei hat bei den nachfolgenden sechs Regeln eine weiter oben stehende Regel gegenüber unten stehenden immer den Vorrang:

1. Die Atome in elementaren Stoffen erhalten die Oxidationszahl 0.
2. Die Summe der Oxidationszahlen aller Atome ist gleich der Ladung des Teilchens: bei neutralen Teilchen ist sie also gleich null, bei Ionen gleich der Ionenladung.
3. Fluor hat immer die Oxidationszahl  $-I$ .
4. Metalle besitzen immer positive Oxidationszahlen, diejenigen der ersten drei Hauptgruppen entsprechend der Hauptgruppennummer.
5. Wasserstoff hat (fast immer) die Oxidationszahl  $+I$ .
6. Sauerstoff hat (fast immer) die Oxidationszahl  $-II$ .

#### Aufgabe 1:

Gib die Oxidationszahlen für nachfolgende Elemente an:

MgCl<sub>2</sub>    Ne    Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>    CuCl<sub>2</sub>    F<sub>2</sub>    P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>    NaOH    CuSO<sub>4</sub>

### 1.2.3 Redoxvorgänge

Redox-Vorgänge lassen sich nun mit Hilfe der Oxidationszahlen folgendermaßen definieren:

Eine **Oxidation** ist ein Vorgang, bei dem die Oxidationszahl der Atome eines Elementes größer wird.

Dies geschieht durch tatsächliche oder, bei Elektronenpaarbindungen, formale Abgabe von Elektronen.

Eine **Reduktion** ist ein Vorgang, bei dem die Oxidationszahl der Atome eines Elementes kleiner wird.

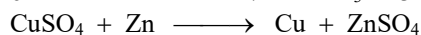
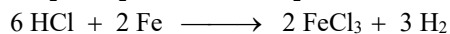
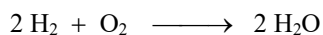
Dies geschieht durch tatsächliche oder formale Aufnahme von Elektronen.

**Redox-Reaktionen** sind Vorgänge, die mit Änderung der Oxidationszahlen verbunden sind.

#### Beispiel:

#### Aufgabe 2:

Bezeichne für nachfolgende Reaktionen Oxidation, Reduktion, Oxidationsmittel und Reduktionsmittel. Gib die Oxidationszahlen an:



### 1.3 Redoxreaktionen zwischen Metallen und ihren Ionen

#### Lehrerversuch (1):

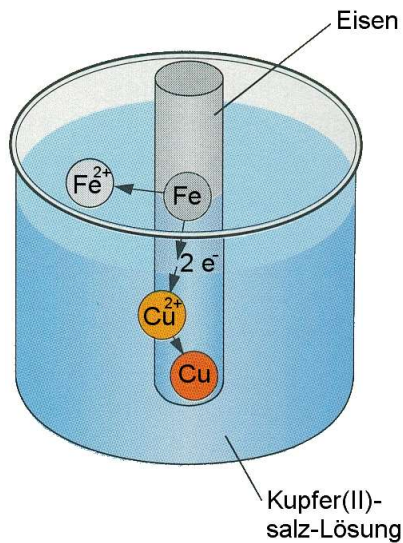


Abb.1: Redoxreaktion zwischen  $\text{Cu}^{2+}$ -Ionen und Eisen (schematisch)

Bringt man einen Eisenstab in eine Kupfer(II)sulfat-Lösung (Abb.1), so scheidet sich auf dem Eisen metallisches Kupfer ab. Dieses ist durch Reduktion von  $\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})}$ -Ionen entstanden. Die erforderlichen Elektronen müssen von Eisenatomen stammen, die durch Abgabe von Elektronen zu  $\text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})}$ -Ionen oxidiert werden und in Lösung gehen.

Tauscht man die Reaktionspartner aus, d.h. bringt man ein Kupferblech und eine Eisensulfat-Lösung zusammen, erfolgt keine Reaktion.

#### **Reaktionsgleichungen:**

#### Lehrerversuche (2):

Kupferstab in Zinkchlorid-Lösung:

Kupferstab in Salzsäure:

Magnesiumband in Salzsäure:

Die Untersuchung weiterer Systeme Metall/Metallsalz-Lösung ergibt eine Ordnungsmöglichkeit der Metalle: In Gegenwart von Ionen „**edlerer**“ Metalle geben „**unedele**“ Metalle Elektronen an diese ab. **Es scheidet sich das edlere Metall ab, das unedlere Metall bildet Kationen und geht in Lösung.**



Experimentell lässt sich eine Reihe ermitteln, in der die Metalle nach dieser Lösungstension geordnet sind:

**Löslichkeitsreihe:**

K Ca Na Mg Al Zn Fe Ni Sn Pb (H<sub>2</sub>) Cu Ag Hg Pt Au  
(unedel) (edel)

In dieser Löslichkeitsreihe kann auch der Wasserstoff aufgeführt werden, obwohl er nicht zu den Metallen gehört. Er kann aber wie die Metalle Kationen bilden. Sein Platz in der Reihe wird dadurch bestimmt, dass die links von ihm stehenden Metalle sich mit verdünnten Säurelösungen unter Wasserstoffentwicklung umsetzen d.h. in Lösung gehen, während die rechts von ihm stehenden halbedelen und edelen Metalle sich in verdünnten Säuren nicht lösen.

Jedes Glied der "Löslichkeitsreihe" (die der elektrochemischen Spannungsreihe entspricht), vermag die rechts von ihm stehenden Metalle aus ihren Salzlösungen auszufällen und dabei selbst in Lösung zu gehen, andererseits wird es von den linksstehenden Metallen aus seinen Salzlösungen abgeschieden.

**Aufgabe 3:**

Was passiert, wenn man einen Nickelstab in eine Magnesiumchlorid-Lösung hält?

Was passiert bei einem Nickelblech in einer Silberchlorid-Lösung?

Schreibe gegebenenfalls die Gleichungen mit allen Begriffen an.

**1.4 Elektroden**

Ein Metall, das in eine Lösung taucht, die frei bewegliche Ionen enthält, bezeichnet man als **Elektrode**.

Metalle, die in Lösungen eintauchen, haben das Bestreben, in Lösung zu gehen. Dies ist eine Oxidation. Man nennt den Vorgang **Lösungstension**.

Das Bestreben eines Metalls, durch Bildung von Kationen in Lösung zu gehen, bezeichnet man als **Lösungstension** (Lösungsdruck).

An einer Elektrode bilden sich daher positive Metallionen, Kationen, die ihre Elektronen im Metallgitter zurücklassen. Die Metalloberfläche lädt sich negativ auf.

Die gelösten, positiv geladenen Metallionen werden durch elektrostatische Anziehung von dieser Metalloberfläche angezogen (Abb.2). Es bildet sich eine **elektrochemische Doppelschicht**.

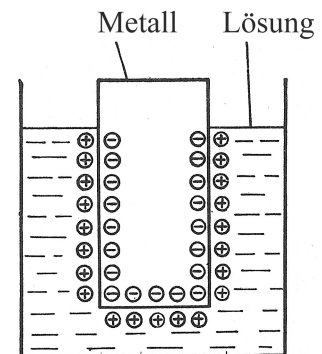


Abb.2: Elektrochemische Doppelschicht

In der elektrochemischen Doppelschicht stellt sich nach kurzer Zeit ein dynamisches **Gleichgewicht** zwischen den Metallionen und dem Metallatomen ein.

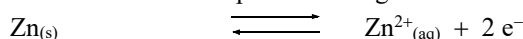
Man bezeichnet diese Metallatome/Metallionen als **Redoxpaar**.

Ein **Redoxpaar** besteht aus Metallatomen und Metallionen, die in einem dynamischen Gleichgewicht stehen.

**Beispiel:**

Eine Zinkelektrode bildet das Redoxpaar Zn/Zn<sup>2+</sup>.

Man kann das Redoxpaar auch folgendermaßen anschreiben:



**Aufgabe 4:**

Schreibe das Redoxpaar, das bei einer Silberelektrode vorliegt, in zwei Schreibweisen an.



## 2 Elektrochemische Spannungsreihe

### 2.1 Redoxsysteme und Elektronendruck

Als **Redoxsystem** bezeichnet man die Teilchen, die an einer Redoxreaktion beteiligt sind.  
Ein Redoxsystem besteht aus zwei **Redoxhalbsystemen**. Zu jedem Redoxhalbsystem gehört ein Redoxpaar, in dem eine Teilreaktion stattfindet.

Wenn man bei den in Kap.1.3 geschilderten Redoxreaktionen die Oxidation räumlich von der Reduktion trennt, so kann der Elektronenübergang von dem Metall mit stärkerer Lösungstension zu den Ionen des edleren Metalls direkt als **Elektronenfluss** d. h. als Strom nachgewiesen werden.

#### Lehrerversuch:

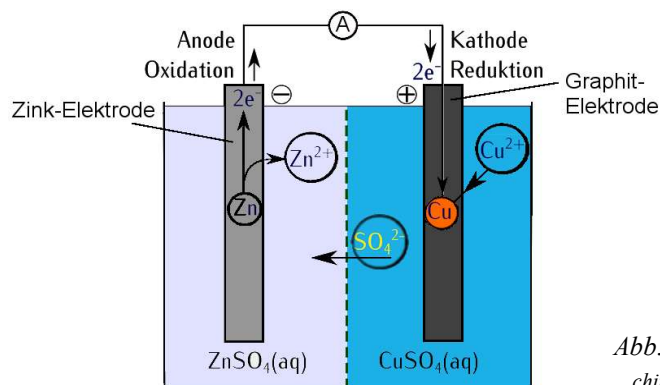


Abb.3 Redoxsystem mit Teilreaktionen (Quelle: chimie.lgk.lu, überarbeitet)

So besitzen bspw. die Zinkatome im Zinkblech eine **größere Lösungstension** als Kupferatome (Abb.3), sie gehen als  $Zn^{2+}$ -Ionen in Lösung und lassen pro Atom 2 Elektronen im Metallgitter zurück.

An der Graphitelektrode scheiden sich  $Cu^{2+}$ -Ionen unter Aufnahme von je 2 Elektronen als Kupferatome ab.

An der Zinkelektrode erfolgt also die Oxidation des Zinks, an der Graphitelektrode die Reduktion der Kupferionen.

Man hat definiert:

Die **Anode** ist die Elektrode, an der die Oxidation stattfindet.  
Die **Kathode** ist die Elektrode, an der die Reduktion stattfindet.

Somit ist die Zinkelektrode zur Anode geworden und trägt eine negative Ladung, die Graphitelektrode ist zur Kathode geworden und trägt eine positive Ladung.

#### **Reaktionsgleichungen:**

Redoxpaar  $Zn/Zn^{2+}$ :

Redoxpaar  $Cu/Cu^{2+}$ :

Zwischen beiden Elektroden ist eine Spannung festzustellen: Die Zinkelektrode erscheint gegenüber der Graphitelektrode negativ. Dies bedeutet, dass auf der Zinkelektrode ein Elektronenüberschuss, auf der Graphitelektrode ein Elektronenmangel herrscht.

Die Ursache hierfür liegt in dem unterschiedlichen **Elektronendruck** der beiden beteiligten **Redoxpaare**:

Der **Elektronendruck** eines Redoxpaares ist eine Folge der Lösungstension des Metalls.

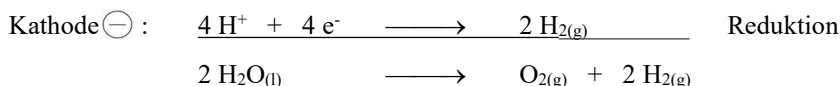
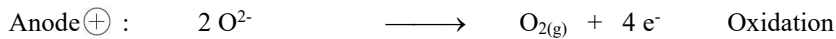
Bei zwei räumlich getrennten Redoxpaaren wird dasjenige mit dem **höheren Elektronendruck** zum **-Pol**, das andere zum +Pol.

Verbindet man die beiden Elektroden, so fließen die Elektronen vom Ort des höheren Elektronendrucks zu dem mit dem niedrigeren Druck.

### Anmerkung:

Bei der Elektrolyse tragen Anode und Kathode genau entgegengesetzte Ladungen: die Anode ist die positive Elektrode, an der die negativen Ionen oxidiert werden; die Kathode ist die negative Elektrode, an der die positiven Ionen reduziert werden.

Beispiel: Elektrolyse von Wasser



## 2.2 Galvanisches Element

### 2.2.1 Halbzelle und Galvanische Zelle

Der mit Oxidation und Reduktion verbundene Elektronendruck eines Redoxhalbsystems zeigt sich im Vergleich zu einem anderen Redoxhalbsystem: Kombiniert man zwei sogenannte **Halbzellen**, so entsteht zwischen ihnen eine Spannung (Potentialdifferenz bzw. elektromotorische Kraft **EMK**).

Als **Halbzelle** bezeichnet man die Anordnung einer **Elektrode** in einer Lösung, die **Ionen** des **Elektrodenelements** enthält.

So z.B. besteht die Halbzelle  $\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}$  aus einer Zinkelektrode, die in eine Zinksalzlösung eintaucht.

Als **Galvanisches Element** oder **Galvanisches<sup>1)</sup> Zelle** bezeichnet man zwei verschiedene Halbzellen, die elektrisch leitend zusammen-geschaltet sind, wobei die **Salzlösungen** durch eine poröse Wand (**Tonzylinder** oder **Diaphragma**) oder **Stromschlüssel** voneinander getrennt sind.

Eine Vermischung der Salzlösungen ist stark eingeschränkt, ein **Stromfluss durch Ionenwanderung** jedoch möglich.

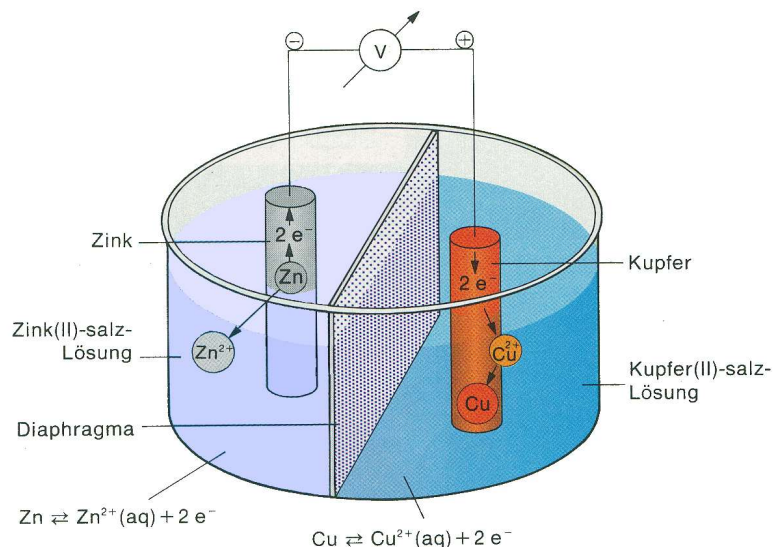


Abb.4: Schematische Darstellung der Galvanischen Zelle (des Galvanisches Elementes)  $\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}/\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}$ , Daniell<sup>2)</sup>-Element

Das in Abb.4 dargestellte Galvanischen Element  $\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}/\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}$  ist bekannt unter dem Namen **Daniell-Element**.

<sup>1)</sup> Luigi GALVANI (1737-1798), italienischer Arzt und Naturforscher, Begründer der Elektrophysiologie (Froschschenkelversuch 1789)

<sup>2)</sup> John Frederic Daniell (1790-1875), britischer Physikochemiker, sein galvanisches Element verbesserte den Betrieb des Telegrafenvorkehrers in England und Amerika.





### 2.2.3 Spannungsreihe der Elemente

Auf entsprechende Weise lässt sich jeweils die EMK anderer Galvanischer Zellen bestimmen und eine Spannungsreihe der Elemente aufstellen.

Galvanische Zelle	EMK
Zn/Zn <sup>2+</sup> //Cu <sup>2+</sup> /Cu	Zn <sup>-</sup> — 1,11 V — Cu <sup>+</sup>
Pb/Pb <sup>2+</sup> //Cu <sup>2+</sup> /Cu	Pb <sup>-</sup> — 0,48 V — Cu <sup>+</sup>
Zn/Zn <sup>2+</sup> //Ag <sup>+</sup> /Ag	Zn <sup>-</sup> — 1,56 V — Ag <sup>+</sup>
Zn/Zn <sup>2+</sup> //Pb <sup>2+</sup> /Pb	Zn <sup>-</sup> — 0,63 V — Pb <sup>+</sup>
Pb/Pb <sup>2+</sup> //Ag <sup>+</sup> /Ag	Pb <sup>-</sup> — 0,93 V — Ag <sup>+</sup>
Cu/Cu <sup>2+</sup> //Ag <sup>+</sup> /Ag	Cu <sup>-</sup> — 0,45 V — Ag <sup>+</sup>

Die Zeichen bedeuten: / Phasengrenze zwischen Metall und dessen Ionenlösung,  
// Grenzen zwischen den Halbzellen.

Abb.6: Verschiedene Galvanische Zellen und deren EMK

Hierbei fällt auf, dass sich die gemessenen Spannungen der einzelnen Galvanischen Zellen additiv verhalten (siehe Abb.6).

#### Aufgabe 6:

Schreibe die galvanischen Zellen von der Aufgabe 5 Seite 8 richtig an.

### 2.3 Standardpotentiale

Der Elektronendruck einer Halbzelle (Einzelpotential) lässt sich nicht absolut bestimmen, man kann ihn immer nur im Vergleich zu anderen Halbzellen als Spannung messen. Um ein Maß für die Elektronendrücke verschiedener Redoxpaare zu erhalten, muss man ein **Bezugssystem** wählen

Man hat sich geeinigt die Standard-Wasserstoffhalbzelle oder vereinfacht **Standard-Wasserstoffelektrode** als Bezugs-elektrode zu verwenden.

Der Elektronendruck des (Halb)Systems H<sub>2</sub>/2H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> wird willkürlich als null festgelegt.

Die Standard-Wasserstoffelektrode (Abb.7) besteht aus einem platinieren Platinblech, das in Salzsäure, c(H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) = 1 mol/L, eintaucht. Die Platinelektrode wird bei 25°C von Wasserstoff (p(H<sub>2</sub>) = 1013mbar) umspült und adsorbiert diesen an ihrer Oberfläche.

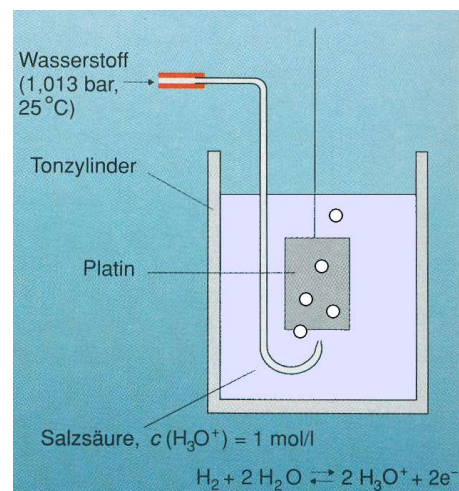
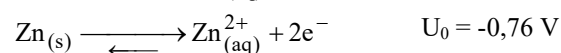
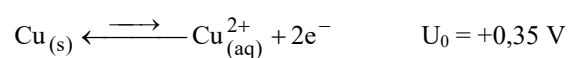


Abb.7: Standard-Wasserstoffelektrode

Man bezeichnet als **Standardpotential** oder **Redoxpotential** U<sup>0</sup> eines Redoxpaares die Spannung, die sich zwischen einer Standard-elektrode dieses Redoxpaares und einer Standard-Wasserstoffelektrode einstellt.

Das **Standardpotential** ist ein Maß für den Elektronendruck des Redoxpaares. Es trägt ein **negatives Vorzeichen**, wenn der **Elektronendruck** des Systems **größer**, ein positives Vorzeichen, wenn er kleiner ist als der des **Bezugssystems** H<sub>2</sub>/2H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>.

#### Beispiele:



Geordnet nach den Standardpotentialen ergeben die verschiedenen Redoxpaare die **Elektrochemische Spannungsreihe** (Abb.8).



Reduzierte Form (Reduktionsmittel)	Oxydierte Form (Oxidationsmittel)	$U^0$ (V)
Li (s)	Li <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	- 3,04
Cs (s)	Cs <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	- 2,92
K (s)	K <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	- 2,92
Ca (s)	Ca <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	- 2,87
Na (s)	Na <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	- 2,71
Mg (s)	Mg <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	- 2,36
Al (s)	Al <sup>3+</sup> + 3 e <sup>-</sup>	- 1,66
H <sub>2</sub> (g) + 2 OH <sup>-</sup>	2 H <sub>2</sub> O + 2 e <sup>-</sup>	- 0,83 *) für pH = 14
Zn (s)	Zn <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	- 0,76
Cr (s)	Cr <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	- 0,56
S <sup>2-</sup>	S (s) + 2 e <sup>-</sup>	- 0,48
Fe (s)	Fe <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	- 0,41
H <sub>2</sub> (g) + 2 H <sub>2</sub> O	2 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	- 0,41 *) für pH = 7
Ti (s)	Ti <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	- 0,34
Ni (s)	Ni <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	- 0,23
Sn (s)	Sn <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	- 0,14
Pb (s)	Pb <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	- 0,13
H <sub>2</sub> (g) + 2 H <sub>2</sub> O	2 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	0,00 *) für pH = 0
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> (aq) + 5 H <sub>2</sub> O	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 4 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	+ 0,17
Cu <sup>+</sup>	Cu <sup>2+</sup> + e <sup>-</sup>	+ 0,17
Cu (s)	Cu <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	+ 0,35
4 OH <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> (g) + 2 H <sub>2</sub> O + 4 e <sup>-</sup>	+ 0,40 *) für pH = 14
Cu (s)	Cu <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	+ 0,52
2 I <sup>-</sup>	I <sub>2</sub> (s) + 2 e <sup>-</sup>	+ 0,54
Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup> + e <sup>-</sup>	+ 0,77
Ag (s)	Ag <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	+ 0,80
4 OH <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> (g) + 2 H <sub>2</sub> O + 4 e <sup>-</sup>	+ 0,82 *) für pH = 7
Hg	Hg <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	+ 0,85
HNO <sub>2</sub> (aq) + 4 H <sub>2</sub> O	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 3 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	+ 0,948
Mn <sup>3+</sup> + 6 H <sub>2</sub> O	MnO <sub>2</sub> (s) + 4 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	+ 0,95
NO (g) + 6 H <sub>2</sub> O	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 4 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + 3 e <sup>-</sup>	+ 0,96
2 Br <sup>-</sup>	Br <sub>2</sub> (l) + 2 e <sup>-</sup>	+ 1,07
Pt	Pt <sup>2+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	+ 1,12
2 H <sub>2</sub> O + 4 H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub> (g) + 4 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + 4 e <sup>-</sup>	+ 1,23 *) für pH = 0
Mn <sup>2+</sup> + 6 H <sub>2</sub> O	MnO <sub>2</sub> (s) + 4 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	+ 1,23
2 Cr <sup>3+</sup> + 14 H <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> + 7 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + 6 e <sup>-</sup>	+ 1,33
2 Cl <sup>-</sup>	Cl <sub>2</sub> (g) + 2 e <sup>-</sup>	+ 1,36
Pb <sup>2+</sup> + 6 H <sub>2</sub> O	PbO <sub>2</sub> (s) + 4 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + 2 e <sup>-</sup>	+ 1,46
Au (s)	Au <sup>3+</sup> + 3 e <sup>-</sup>	+ 1,50
Mn <sup>2+</sup> + 12 H <sub>2</sub> O	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> + 8 H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> + 5 e <sup>-</sup>	+ 1,51
2 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>2-</sup> + 2 e <sup>-</sup>	+ 2,01
2 F <sup>-</sup>	F <sub>2</sub> (g) + 2 e <sup>-</sup>	+ 2,87

Abb.8: Elektrochemische Spannungsreihe (Standardpotentiale) und Potentiale verschiedener Redoxpaare (Redoxhalbsysteme). Bei Werten mit \*) handelt es sich nicht um Standardpotentiale, sondern um Zellspannungen bei bestimmtem pH-Wert. Alle Ionen liegen hydratisiert vor.



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**.





**TP 1: Kräfte und Resultierende**

**1 Zusammensetzung von Kräften**

**Zweck des Versuches:**

(Beim Verfassen des Berichtes zu formulieren)

**Versuchsaufbau:**

Ein Gewichtsteller wird entsprechend Abb.1 an zwei Kraftmesser gehängt:

- Knüpfe hierzu an ein Stück Bauschnur von ca. 35 cm in der **Mitte** und an beiden **Enden jeweils eine Schlaufe!**
- Befestige den Gewichtsteller über die Schnur an den beiden Kraftmessern.
- Fixiere die Kraftmesser in den Doppelmuffen derart daß Schnur und Kraftmesser fluchten.
- Die Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  werden mit Hilfe einer Winkelscheibe eingestellt bzw. gemessen.

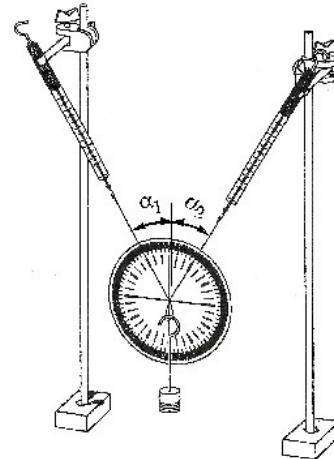


Abb.1: Versuchsaufbau

**Versuchsdurchführung:**

**Teil 1**

- Erhöhe die Masse des Gewichtstellers auf die Gesamtmasse  $m = 100 \text{ g}$ .
- Wähle den Abstand der beiden Stativstangen und die Neigung der Kraftmesser so, daß die Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  zur Senkrechten gleich groß sind und den Werten in der Tabelle (Abb.2) entsprechen.
- Achte darauf daß Seil und Kraftmesser immer in einer Ebene fluchten.
- Lies die beiden Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  an den Kraftmessern ab und halte die Meßergebnisse tabellarisch fest.
- Wiederhole die Vorgehensweise für alle vorgegebenen Winkel (Abb.2).

Gesamtmasse: $m = 100 \text{ g}$			
$\alpha_1$ in $^\circ$	$\alpha_2$ in $^\circ$	$F_1$ in N	$F_2$ in N
20	20		
30	30		
40	40		
50	50		

Abb.2: Meßwerte

**Teil 2**

- Stelle die Stativstangen mit den Kraftmessern und dem Gewichtsteller wieder in die Ausgangsstellung ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 20^\circ$ ).
- Verschiebe den Kraftmesser 2 N schrittweise in die Höhe, um die in der Tabelle (Abb.3) vorgegebenen Werte für den Winkel  $\alpha_1$  einzustellen.
- Lies den Winkel  $\alpha_2$  und die beiden Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  an den Kraftmessern ab und halte die Meßergebnisse tabellarisch fest.
- Wiederhole die Vorgehensweise für alle vorgegebenen Winkel (Abb.3).

Gesamtmasse: $m = 100 \text{ g}$			
$\alpha_1$ in $^\circ$	$\alpha_2$ in $^\circ$	$F_1$ in N	$F_2$ in N
40			
55			
70			
90			
115			

Abb.3: Meßwerte

**Versuchsauswertung:**

- Berechne aus den Winkeln  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  den Gesamtwinkel  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ .
- Lege einen Kräftemaßstab fest und zeichne für  $\alpha_1 = 20^\circ$  (Teil 1),  $\alpha_1 = 40^\circ$  (Teil 1),  $\alpha_1 = 40^\circ$  (Teil 2),  $\alpha_1 = 70^\circ$  (Teil 2) und  $\alpha_1 = 115^\circ$  (Teil 2) jeweils die beiden Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  unter den entsprechenden Winkeln auf.
- Ermittle hierzu die Resultierende mit Hilfe eines Kräfteparallelogramms.
- Vergleiche den Betrag der Resultierenden mit dem Betrag der Gewichtskraft. Was stellst du fest?

**Schlußfolgerung:**

Was ergibt sich aus dem in diesem Versuch Erlernten in Bezug auf den Zweck des Versuches?

**Zusammenfassung:** (graphisch, allgemein)

Kräfteparallelogramm: . . .

## 2 Seilkräfte und Resultierende

**Zweck des Versuches:**

Die auftretende Seilkraft bei der Umlenkung an einer Rolle sowie die an der Halterung der Rolle auftretende Kraft sollen ermittelt werden.

**Versuchsaufbau:**

- Die Halterung einer Rolle wird an den Kraftmesser 2 N gehängt, der mit Hilfe von einer Doppelmuffe und einem Haltebolzen an einer Stativstange fixiert wird.
- Ein Stück Bauschnur wird über die Rolle gelegt. An ein Ende wird ein Gewichtsteller mit der Gesamtmasse  $m = 40$  g gehängt, an das andere Ende der Kraftmesser 1 N.
- Der Winkel  $\alpha$  zwischen der Richtung der Wirkungslinie der Gewichtskraft und der Wirkungslinie des Kraftmessers 1 N wird mit Hilfe einer Winkelscheibe eingestellt bzw. gemessen.

**Aufgabe:**

Zeichne den Versuchsaufbau **und zeige ihn dem Lehrer.**

Abb.4: Versuchsaufbau

**Versuchsdurchführung:**

- Der Winkel  $\alpha$  zwischen der Wirkungslinie der Gewichtskraft und der Wirkungslinie des Kraftmessers 1 N wird entsprechend den Werten in Abb.5 verändert.
- Die am Kraftmesser 1 N gemessene Kraft  $F_1$  und die an der Halterung der Rolle (Kraftmesser 2 N) auftretende Kraft  $F_K$  werden tabellarisch (in Abb.5) festgehalten.
- Achte darauf daß Seil und Kraftmesser immer in einer Ebene fluchten.
- Bestimme die Masse der Rolle mit Halterung.



Masse Gewichtsteller: $m =$		Masse Halterung und Rolle: $m_R =$	
Winkel $\alpha$ in $^\circ$	(Kraftmesser 1 N) $F_1$ in N	(Kraftmesser 2 N) $F_K$ in N	
90			
120			
105			
70			
50			
0			

Abb.5: Meßwerte

**Versuchsauswertung:**

- Berechne den Betrag der Gewichtskraft  $F_G$ . Vergleiche den Wert mit  $F_1$ . Was stellst du fest?
- Vergleiche die Gewichtskraft  $F_G$  mit der Kraft  $F_K$  am Kraftmesser 2 N. Was stellst du fest?
- Ermittle für  $\alpha = 50^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$  und  $\alpha = 120^\circ$  mit Hilfe eines Kräfteparallelogramms die Resultierende aus  $F_G$  und  $F_1$ . Vergleiche den Betrag der Resultierenden  $F_R$  mit der Kraft  $F_K$  am Kraftmesser 2 N. Was stellst du fest?
- Berücksichtige die Masse der Rolle mit Halterung und wiederhole den Vergleich zwischen  $F_K$  und  $F_R$ . Was stellst du fest?

**Fehlerbetrachtung:**

Welche Fehler treten bei der Versuchsdurchführung auf?

**Schlußfolgerung:**

Was ergibt sich aus dem in diesem Versuch Erlernten in Bezug auf den Zweck des Versuches?

**Zusammenfassung:**

(Rolle mit Seil und auftretenden Kräften)



## TP 2: Kräfte und Momente

### 1 Auflagerkräfte an einem Balken

#### Zweck des Versuches:

...

#### Versuchsaufbau:

Zunächst bedarf es zwei Schlaufen von ca. 10 cm Länge, die aus Bauschnüren hergestellt werden.

Ein Balken wird mittels der Schlaufen so an die beiden Kraftmesser gehängt (Abb.1), daß er waagrecht hängt. Hierzu können die Kraftmesser vertikal in den Doppelmuffen verschoben werde.

Die Auflagerkräfte des Balkens werden an den Kraftmessern gemessen.

Im 2. Teil des Versuches wird ein Gewichtsteller an den Balken gehängt und die Auflagerkräfte werden wiederum gemessen.

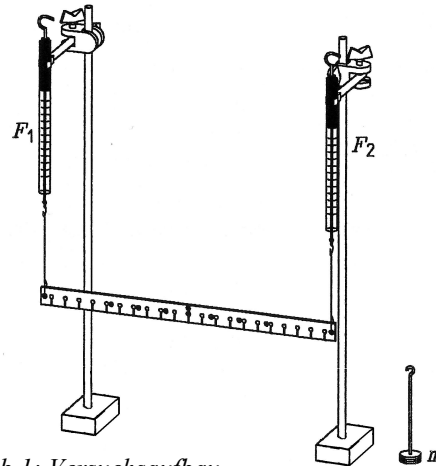


Abb.1: Versuchsaufbau

#### Versuchsdurchführung:

- Achte bei allen Messungen darauf daß der Balken waagrecht und Kraftmesser mit Schnüren senkrecht hängen.

##### Teil 1

- Bestimme die Gewichtskraft des Balkens.
- Schiebe die Schlaufen von außen an die Positionsstifte entsprechend der Tabelle (Abb.2).
- Die beiden Auflagerkräfte  $F_1$  und  $F_2$  werden an den Kraftmessern abgelesen und tabellarisch (Abb.2) festgehalten.
- Lies die Kräfte an den Kraftmessern ab und halte die Meßergebnisse fest.

Gewichtskraft des Balkens: $F_G =$			
Pos. links	Pos. rechts	$F_1$ (links) in N	$F_2$ in N
3	3		
6	6		
10	10		
10	8		
10	6		
10	4		
10	2		
10	0		

Abb.2: Meßwerte

**Teil 2**

- Hänge den Balken an den äußeren Positionen (Pos.10 links und 10 rechts) an die beiden Kraftmesser.  
Gewichtskraft des Balkens:  $F_G =$   
Gewichtskraft des Gewichtstellers:  $F_m =$

- Verwende einen Gewichtsteller der Gesamtmasse 50 g. Überprüfe die Gewichtskraft!

- Hänge den Gewichtsteller in der Pos. 9 rechts an den Balken, lies die beiden Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  an den Kraftmessern ab und notiere sie in der Tabelle (Abb.3).

- Wiederhole die Vorgehensweise, indem du den Gewichtsteller entsprechend den Positionen in der Tabelle (Abb.3) schrittweise am Balken verschiebst. Halte die Meßergebnisse tabellarisch fest.

Pos. rechts	$F_1$ in N	$F_2$ in N	Pos. links	$F_1$ in N	$F_2$ in N
9			9		
7			7		
5			5		
3			3		
1			1		

Abb.3: Messwerte

**Versuchsauswertung:**

**Teil 1**

- Lege einen Kräftemaßstab fest und zeichne für die 1., die 4. und die letzte Messung einen Balken mit den Kräften  $F_1$ ,  $F_2$  und  $F_G$ . Was kannst du über die Kräfte sagen?
- Berechne für alle Messungen die Summe der Kräfte  $F_{ges} = F_1 + F_2$  und vergleiche sie mit der Gewichtskraft  $F_G$  des Balkens. Was stellst du fest?
- Berechne für alle Messungen das Kräfteverhältnis  $F_1/F_2$  und vergleiche es mit den Positionen der Auflager. Welchen Zusammenhang erkennst du? Formuliere den Zusammenhang mathematisch.
- Durch welche physikalische Größe kann die Position der Auflager gekennzeichnet werden?
- Betrachte die letzte Messung. Welche physikalische Bedeutung hat die Mitte des Balkens?

**Teil 2**

- Berechne für alle Messungen die Summe der Kräfte  $F_{ges} = F_1 + F_2$  und vergleiche sie mit der vorliegenden Gewichtskraft. Was stellst du fest?
- Trage die Auflagerkräfte  $F_1$  und  $F_2$  in ein Diagramm (Kraft, Position) (Abb.4) ein. Verbinde die Meßwerte durch eine Linie. Welchen Zusammenhang erkennst du zwischen den Auflagerkräften und dem Angriffspunkt der Gewichtskraft des Gewichtstellers?
- Wo schneiden sich die beiden Linien? Welche Bedeutung hat diese Position?
- Bestimme durch Extrapolation der Kurven, welche Kraft man an den äußersten Positionen (Pos. 10 links und Pos. 10 rechts) messen würde? Wie kann man diesen Wert erklären?
- Welchen Wert würde der Kraftmesser  $F_1$  anzeigen, wenn man den Gewichtstellers an der Pos. 10 rechts aufhängen und die Gewichtskraft  $F_m$  erhöhen würde?
- Wie würde sich die Kurve der Kraft  $F_1$  verändern, wenn man die Gewichtskraft  $F_m$  des Gewichtstellers erhöhen würde?

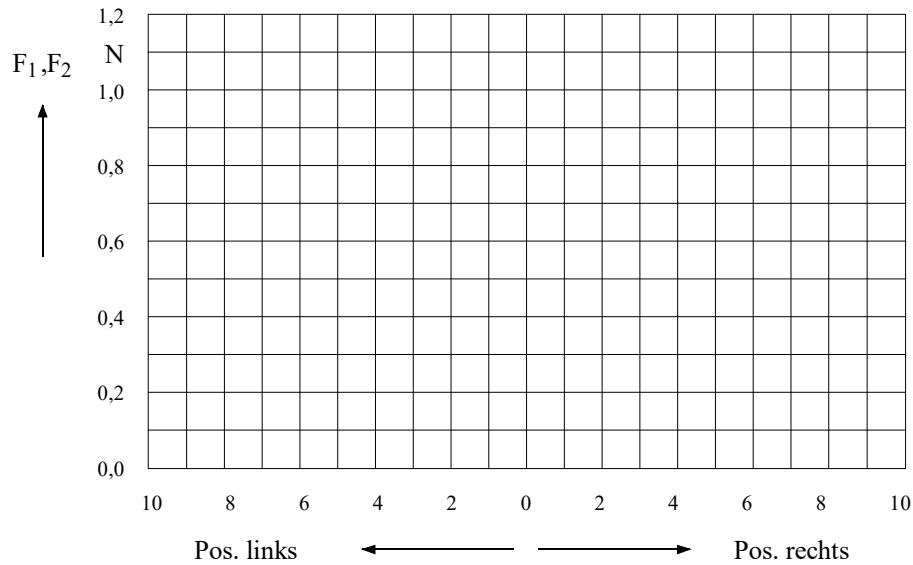


Abb.4: Diagramm (Kraft, Position)

**Schlußfolgerung:**

Was ergibt sich aus dem Erlernten in Bezug auf den Zweck des Versuches?

**Zusammenfassung:**

Kräftegesetz:

(Gleichung für den Zusammenhang zwischen **allen Kräften**, die in einer Richtung (Achse im Koordinatensystem) an einem Bauteil wirken)

## 2 Wirkungsweise eines Hebels

**Zweck des Versuches:**

...

**Versuchsaufbau:**

Ein Hebel wird mittig an einer Stativstange fixiert (Abb.5) und mit der Gewichtskraft eines Gewichtstellers belastet.

Die an einer vorgegebenen Stelle erforderliche Kraft, um den Hebel in waagerechter Stellung zu halten, wird mit einem Kraftmesser 2N gemessen.

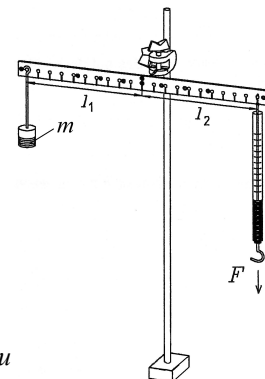


Abb.5: Versuchsaufbau

**Versuchsdurchführung:**

- Achte bei allen Messungen darauf, daß der Balken waagrecht steht und der Kraftmesser vertikal gehalten wird.
- Bringe die Masse  $m$  des Gewichtstellers auf den in der Tabelle (Abb.6) vorgegebenen Wert (Pos. links) und hänge ihn an die angegebene Position am Hebel.
- Fixiere den Kraftmesser an die in der Tabelle (Abb.6) vorgegebene Position (Pos. rechts). Miß die erforderliche Kraft, um den Hebel waagrecht zu halten, und notiere den Meßwert.
- Wiederhole die Vorgehensweise für alle vorgegebenen Massen bzw. Positionen (Abb.6).

m in g	Pos. Gew.- teller (links)	Pos. Kraft- messer (rechts)	F in N
100	10	10	
100	6	10	
100	2	10	
40	10	10	
40	10	6	
40	10	2	

Abb.6: Meßwerte

**Versuchsauswertung:**

a) Zeichne eine Tabelle mit 6 Kolonnen, in der du eine Zeile für die Erklärungen und 6 Zeilen für die Meßgrößen vorsiehst.

Berechne für alle Messungen nachfolgende Werte und trage sie in die Tabelle ein:

- die Last  $L$  am Hebel entsprechend der Gewichtskraft der Masse  $m$
- der Lastarm d.h. der Abstand  $l_1$  der Last  $L$  zum Drehpunkt des Hebels
- das Produkt aus Last und Lastarm
- die Kraft  $F$  am Kraftmesser
- der Kraftarm d.h. der Abstand  $l_2$  der Kraft  $F$  zum Drehpunkt des Hebels
- das Produkt aus Kraft und Kraftarm.

Betrachte die in der Tabelle berechneten Werte. Welchen Zusammenhang erkennst du?

Formuliere diese Erkenntnis in Worten und in einer Formel.

b) Wie ändert sich die Kraft am Kraftmesser, wenn eine der anderen Größen ändert? Vervollständige nachfolgende Tabelle:

Last $L$	Lastarm $l_1$	Kraftarm $l_2$	Kraft $F$
konstant	kleiner	konstant	
konstant	konstant	kleiner	
kleiner	konstant	konstant	

c) Beim Hebel verwendet man die Begriffe Last, Lastarm, Kraft und Kraftarm. Allgemein spricht man von Kraft und Wirkabstand/Hebelarm, das Produkt bezeichnet man als (Dreh)moment.

Wie müssen **die Drehmomente** der Last  $L$  und der Kraft  $F$  sein, damit der Hebel in der waagerechten Position bleibt? Denke an die Vorzeichenregelung bei Momenten ☺!

d) Nimm an daß der Hebel mit **mehreren Lasten  $L_i$**  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) an verschiedenen Lastarmen  $l_{1i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) belastet wird. Wie berechnet sich die erforderliche Kraft  $F$  mit Kraftarm  $l_2$ ? (Formel)

**Schlußfolgerung:**

Was ergibt sich aus dem Erlernen in Bezug auf den Zweck des Versuches?

**Zusammenfassung:**

Momentensatz:

(Gleichung für den Zusammenhang zwischen allen Kräften/Kraftarmen bzw. Momenten, die an einem Bauteil wirken)





## TP 3: Grundlagen der Elektrizitätslehre

### Zweck der Versuche:

...

## 1 Widerstandsmessung

### Zweck der Versuche:

(Beim Verfassen des Berichtes zu den Punkten a), b) und c) zu formulieren)

#### a) Einzelwiderstand

Miss mit einem Multimeter den genauen Wert der vorgegebenen Widerstände. Vergleiche die Messwerte mit den markierten Werten. Trage alle Werte in eine Tabelle (Abb.1) ein und berechne die Abweichungen.

Nummer Widerstände:		Nummer Multimeter:	
Markierter Widerstand $R_{\text{soll}}$ in $\Omega$	Gemessener Widerstand $R_{\text{ist}}$ in $\Omega$	Absolute Abweichung $\Delta R$ in $\Omega$	Relative Abweichung $\Delta \bar{R}$ in %
0		(nach	(nach
1		Durchführung	Durchführung
3		aller	aller
10		Messungen,	Messungen, am
33		am Ende der	Ende der
100		Stunde oder	Stunde oder zu
333		zu Hause)	Hause)
1000			
3333			
$\infty$			

Abb1: Widerstandsmessung und Fehlerrechnung

### Beobachtungen/Bemerkungen/Mögliche Erklärungen . . . :

(vom Schüler zu formulieren)

### Schlussfolgerung:

(vom Schüler zu formulieren)

#### b) Serienschaltung von Widerständen

Miss den Gesamtwiderstand, nachdem du mehrere Widerstände von 1 k $\Omega$  hintereinander (in Reihe oder in Serie) geschaltet hast.

Anzahl der Widerstände von 1 k $\Omega$	2	3	4	5
Gesamtwiderstand $R_{\text{ges}}$ in k $\Omega$				

Abb.2: Serien- (Reihen-) schaltung von Widerständen

**Auswertung:**

(nach Durchführung aller Messungen, am Ende der Stunde oder zu Hause)

**Schlussfolgerung:**

(vom Schüler zu formulieren)

**Allgemeine Berechnungsformel:**

...

**c) Parallelschaltung von Widerständen**Miss den Gesamtwiderstand, nachdem du mehrere Widerstände von 1 k $\Omega$  parallelgeschaltet hast.

Anzahl der Widerstände von 1 k $\Omega$	2	3	4	5
Gesamtwiderstand R <sub>ges</sub> in k $\Omega$				

Abb.3: Parallelschaltung von Widerständen

**Auswertung:** ...**Schlussfolgerung:** ...**Allgemeine Berechnungsformel:** ...**2 Spannungs- und Strommessung****Zweck der Versuche:**

(Beim Verfassen des Berichtes zu formulieren)

**a) Messstellen**Die Spannung wird gemessen indem das **Spannungsmessgerät (Voltmeter)** **parallel** an die **Messpunkte** angeschlossen wird, **zwischen denen** die **Spannungsdifferenz** gemessen werden soll.Der Strom wird gemessen indem das **Strommessgerät (Amperemeter)** in den Stromkreis eingebaut wird d.h. **mit** den **Verbrauchern** (z.B. Widerstände, Motor, Lampe) **in Reihe (Serie)** geschaltet wird.Zeichne den Schaltplan einer Spannungsquelle mit einem Widerstand von 1 k $\Omega$ , bei dem die **Spannung am Widerstand** und der **Strom**, der fließt, gemessen werden.**Versuchsaufbau (Schaltplan):**

Zeig dem Lehrer den Versuchsaufbau

Bau den Stromkreis auf und stell dabei an den Messgeräten die richtigen Messbereiche (**Messbereich für Strom: 200 mA**) ein. Die **Spannungsquelle (= das Netzgerät)** darf **nicht eingeschaltet** werden!

Halte Rücksprache mit dem Lehrer.



## b) Ohm'sches Gesetz

Miss den genauen Wert eines Widerstandes mit der Markierung 1 k $\Omega$ .

Miss mit dem Versuchsaufbau aus Abschnitt 2 a) den Strom, der bei verschiedenen Spannungsdifferenzen entspr. Abb.4 am Widerstand 1 k $\Omega$  fließt. Wähle den **Messbereich 200 mA**.

Nummer Voltmeter:	Nummer Amperemeter:					
Spannung(sdifferenz) U am 1 k $\Omega$ -Widerstand in V	0	5	10	15	20	25
Strom I in A						

Abb.4: Spannungs- und Strommessung

**Schlussfolgerung:** ...

**Allgemeine Berechnungsformel:**

(Gesetz von OHM)

## c) Serienschaltung von Widerständen

Zeichne einen Schaltplan mit zwei in Serie geschalteten Widerständen von jeweils 1 k $\Omega$ . Die **Spannung** wird an der **Spannungsquelle** und an **jedem der beiden Widerstände** gemessen, wobei die Messungen eventuell in mehreren Schritten durchgeführt werden, wenn nur ein Spannungsmessgerät zur Verfügung steht.

**Versuchsaufbau (Schaltplan):**

Zeig dem Lehrer den Versuchsaufbau

Bau den Stromkreis auf und stell dabei an den Messgeräten die richtigen Messbereiche ein. **Die Spannungsquelle (= das Netzgerät) darf noch nicht eingeschaltet werden!**

Halte Rücksprache mit dem Lehrer.

**Versuchsdurchführung/Beobachtungen/Messwerte:** ...(Spannung am Netzgerät ca. 19 V)

**Auswertung:** ...

**Schlussfolgerung:** ... (Berechnungsformel)

### 3 Innenwiderstand der Messgeräte

#### Zweck der Versuche:

(Beim Verfassen des Berichtes zu formulieren)

#### a) Strommessgerät (Amperemeter)

Am Versuchsaufbau von Abschnitt 2b) soll nun zusätzlich der Spannungsabfall (Spannungsdifferenz) an den Ein- und Ausgangsbuchsen des Netzgerätes betrachtet werden.

#### Versuchsaufbau (Schaltplan):

Es wird eine **Spannung** von  $U = 10 \text{ V}$  **am Netzgerät** eingestellt und am Spannungsmessgerät überprüft. Des Weiteren werden der **Spannungsabfall am Widerstand** und der **Strom** gemessen.

Überlege dir nach Durchführung der Messungen, wie groß die Spannung am Strommessgerät war. Denke an Abschnitt 2c).

Wie groß war demzufolge der Widerstand des Strommessgeräts? (Denke an das Gesetz von Ohm.)

#### b) Spannungsmessgerät (Voltmeter)

Zwei Widerstände von je  $1 \text{ k}\Omega$  werden parallelgeschaltet. Dabei sollen

- der **Strom durch jeden Widerstand**,
- der **Strom vor der Verzweigung**,
- der **Spannungsabfall zwischen den Verzweigungen** und
- der **Spannungsabfall am Netzgerät** gemessen werden.

Zeichne den Schaltplan.

#### Versuchsaufbau (Schaltplan):

Halte Rücksprache mit dem Lehrer.

Es wird eine Spannung von  $U = 10 \text{ V}$  am Netzgerät eingestellt und am Spannungsmessgerät überprüft. Der Strom an den drei Meßstellen wird gemessen, wobei die Messungen eventuell in mehreren Schritten durchgeführt werden, da nur ein Strommessgerät zur Verfügung steht.

Überlege dir - und schreibe die Früchte deiner Überlegungen nieder ☺ - nach Durchführung der Messungen, wie groß der Strom durch das Spannungsmessgerät war.

Wie groß war demzufolge der Widerstand des Spannungsmessgerätes?

#### Schlussfolgerung:

(Was kannst du somit allgemein über den Innenwiderstand eines Strom- bzw. eines Spannungsmessgerätes sagen?)



## TP 4: Gefüge von Eisenwerkstoffen

### 1 Schliffbilder von Proben

#### Zweck des Versuches:

...

#### Versuchsaufbau:

Es wird ein Auflichtmikroskop verwendet. Durch ein Okular kann die Schliffprobe direkt betrachtet werden. Mittels einer Kamera kann das Bild auch an einen Fernseher übertragen werden, so daß das Kristallgefüge am Bildschirm zu sehen ist.

#### Versuchsdurchführung:

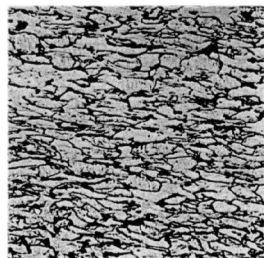
- Zunächst wird die Schliffprobe mit Hilfe einer Knetmasse und einer Preßvorrichtung derart fixiert, daß die geschliffene Oberfläche parallel zur Aufnahme am Mikroskop ist.
- Das Scharfstellen erfolgt durch die 3-dimensionale Bewegung der eingespannten Probe. Es muß eine geeignete Position gewählt werden, bei der man das Schliffbild deutlich erkennt.
- Durch Benutzen einer anderen Linse kann das Schliffbild vergrößert oder verkleinert werden.

### 2 Aufgaben

#### Aufgabe 1:

Ordne die nachfolgenden Gefüge den entsprechenden Schliffbildern zu:

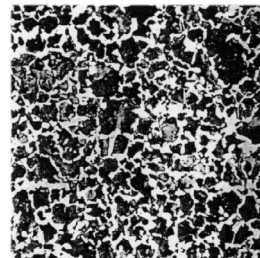
- a) Übereutektisches, weißes Gußeisen: Primärzementit in Ledeburit
- b) Ferritischer Grauguß: Graphit in Ferrit
- c) Untereutektoider Stahl: Perlit (dunkel) und Ferritnetz
- d) Kaltverformter Stahl (Längsschliff)
- e) Graues Roheisen: Graphit, Ferrit, Perlit



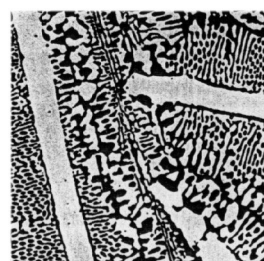
①  
M200:1



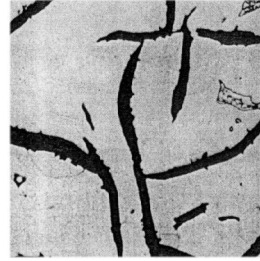
②  
M250:1



③  
M100:1



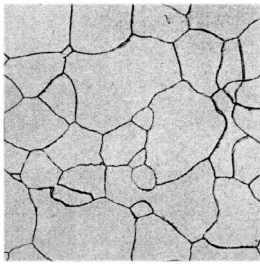
④  
M100:1



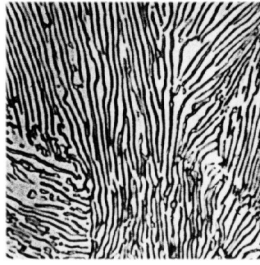
⑤  
M200:1

**Aufgabe 2:**

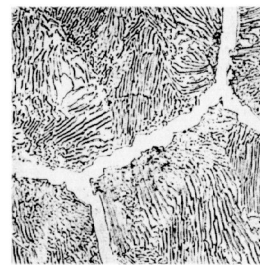
Bezeichne die **Gefüge** und **Gefügebestandteile** nachfolgender Schlibfbilder:



①  
M250:1



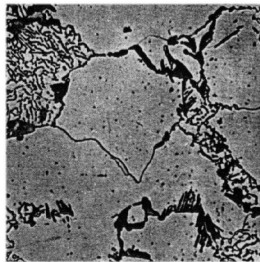
②  
M1000:1



③  
M500:1



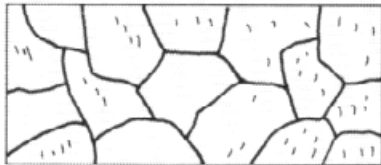
④  
M200:1



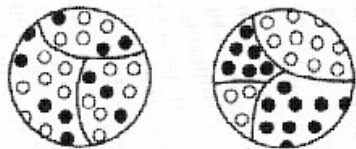
⑤  
M300:1

**Aufgabe 3:**

1. Wie wird das Metallgefüge sichtbar gemacht?
2. Begründe, weshalb reine Metalle für technologische Zwecke legiert werden
3. Kennzeichne durch Pfeile Körner und Korngrenzen



4. Nenne die Namen der dargestellten Legierungstypen



5. Was kann aus dem Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild abgelesen werden?
6. Welches Gefüge hat Stahl mit 1,5% Kohlenstoff bei 1200°C?
7. Wie verändert sich das Gefüge von Stahl mit 0,3% Kohlenstoff beim Erwärmen von Raumtemperatur auf 1000°C. Beschreibe jede Veränderung.
8. a) Welche (Massen-)Konzentration an Kohlenstoff hat Zementit? (Verwende deine Kenntnisse aus dem Chemie-Unterricht: Schreibe zunächst die chemische Formel hin und berechne dann).  
b) Suche einen Bezug zu dem Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild.

...

## TP 5: PC-Berechnungen von Statikaufgaben

### Zweck des Versuches:

...

## 1 Ermittlung der Resultierenden

### Aufgabe 1:

Vier Männer ziehen einen Wagen an Seilen, die in die Zugöse der Deichsel (Abb.1) eingehängt sind. Die Zugkräfte betragen  $F_1 = 400 \text{ N}$ ,  $F_2 = 350 \text{ N}$ ,  $F_3 = 300 \text{ N}$  und  $F_4 = 500 \text{ N}$ .

Berechne den Betrag der Resultierenden  $F_R$  und den Richtungswinkel  $\alpha_R$ .

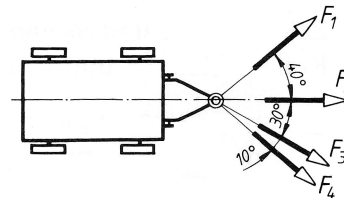


Abb.1: Seilkräfte bei Aufgabe 1

### Versuchsdurchführung:

- Löse die Aufgabe in einem Excel-Sheet. Die Lösung muß derart gestaltet sein, daß jederzeit das Ändern einer Angabe (Kraft oder Winkel) und das Einfügen einer weiteren Kraft zu einem neuen richtigen Ergebnis führt.
- Überprüfe dein Resultat. Die Lösung lautet:  $F_R = 1316,80 \text{ N}$  und  $\alpha_R = -9,37^\circ = 350,63^\circ$
- Überprüfe die Funktionalität deiner Arbeit, indem du die Beträge der 4 Kräfte halbiert.
- Überprüfe die Funktionalität deiner Arbeit, indem du zu  $F_1$  bis  $F_4$  eine 5. Kraft  $F_5 = 1316,80 \text{ N}$  mit  $\alpha_5 = 170,63^\circ$  hinzufügst. Stimmt das neue Ergebnis?
- Speichere deine Arbeit unter „Result-Kräfte“.

### Aufgabe 2:

Die Achslasten eines Lastkraftwagens (Abb.2) betragen  $F_1 = 50 \text{ kN}$ ,  $F_2 = F_3 = 52 \text{ kN}$ , die Achsabstände  $l_1 = 4,7 \text{ m}$  und  $l_2 = 1,3 \text{ m}$ .

Berechne den Betrag der Resultierenden  $F_R$  und den Richtungswinkel  $\alpha_R$ .

Berechne den Abstand  $l_R$  der Wirklinie der Resultierenden von der Vorderachse.

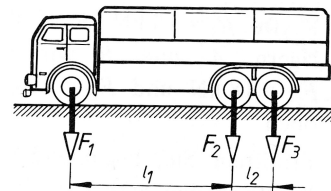


Abb.2: Achslasten bei Aufgabe 2

### Aufgabe 3:

Ein Träger (Abb.3) ist mit zwei parallelen Kräften  $F_1 = 30 \text{ kN}$  und  $F_2 = 20 \text{ kN}$  belastet und dazwischen durch ein Seil mit der Zugkraft  $F_3 = F_S = 25 \text{ kN}$  unter dem Winkel  $\alpha = 60^\circ$  schräg nach oben abgefangen. Die Abstände betragen  $l_1 = 2 \text{ m}$ ,  $l_2 = 1,5 \text{ m}$  und  $l_3 = 0,7 \text{ m}$ .

Berechne den Betrag der Resultierenden  $F_R$  und den Richtungswinkel  $\alpha_R$ .

Berechne den Abstand  $l_R$  der Wirklinie der Resultierenden vom Punkt B.

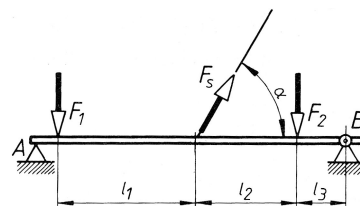


Abb.3: Kräfte bei Aufgabe 3

### Versuchsdurchführung zu den Aufgaben 2 und 3:

- Löse den ersten Teil der Aufgabe 2 mit Hilfe des Excel-Sheetes von Aufgabe 1.
- Löse nun den zweiten Aufgabenteil.
- Überprüfe dein Resultat. Die Lösung lautet:  $F_R = 154 \text{ kN}$ ,  $\alpha_R = -90^\circ$  und  $l_R = 3,613 \text{ m}$ .
- Überprüfe die Funktionalität deiner Arbeit, indem du Aufgabe 3 ausprobierst. (Lösung:  $F_R = 30,98 \text{ kN}$ ,  $\alpha_R = -66,21^\circ$  und  $l_R = 2,981 \text{ m}$ ).
- Speichere deine Arbeit unter „Result-Momente“.

## 2 Ermittlung unbekannter Kräfte

### Aufgabe 4:

Eine Walze mit der Gewichtskraft von  $F_1 = 3,8 \text{ kN}$  hängt an einer Pendelstange unter  $\gamma = 40^\circ$  und drückt auf die darunter angeordnete zweite Walze (Abb.4). Die Abstände betragen  $l_1 = 280 \text{ mm}$  und  $l_2 = 320 \text{ mm}$ .

Berechne die Zugkraft  $F_2$  in der Pendelstange und die Anpreßkraft  $F_3$  zwischen den Walzen.

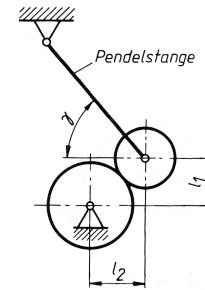


Abb.4: Kräfte bei Aufgabe 4

### Aufgabe 5:

Eine am Kranhaken hängende Last (Abb.5) mit einer Gewichtskraft von  $F_1 = 2 \text{ kN}$  soll zum Absetzen seitlich um  $l_2 = 1 \text{ m}$  verschoben werden. Die Höhe beträgt  $l_1 = 4 \text{ m}$ .

Wie groß sind die waagerechte Verschiebkraft  $F_2$  und die Zugkraft  $F_3$  in den beiden Seilen. (Beide Seilkräfte sind gleich groß und ihre Resultierende geht durch den Mittelpunkt der unteren Seilrolle).

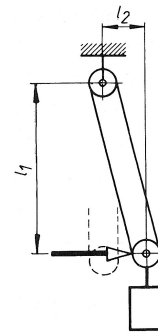


Abb.5: Kräfte bei Aufgabe 5

### Versuchsdurchführung zu den Aufgaben 4 und 5:

- Löse die Aufgabe 4 zunächst auf einem Blatt Papier.
- Hilfestellung:  $\sin\alpha \cdot \cos\beta - \cos\alpha \cdot \sin\beta = \sin(\alpha - \beta)$ .
- Löse die Aufgabe nun in einem Excel-Sheet unter Verwendung der aufgestellten Gleichungen.
- Überprüfe dein Resultat. Die Lösung lautet:  $F_2 = 2,894 \text{ kN}$  und  $F_3 = 2,946 \text{ kN}$ .
- Überprüfe die Funktionalität deiner Arbeit, indem du Aufgabe 5 ausprobierst.  
Tip: Die Aufgabe zunächst auf einem Blatt Papier lösen (frei machen ...)  
(Lösung:  $F_2 = 0,5 \text{ kN}$  und  $F_3 = 1,031 \text{ kN}$ ).
- Speichere deine Arbeit unter „Ermittlung-Kräfte“.



## TP 6: Windenergie

### Zweck der Versuche:

...

### 1 Versuchsaufbau

Der Aufbau des Windgenerators und des Windkanals (Abb.1) erfolgt mit Hilfe der Klemmreiter auf der Profilschiene. Dabei sind zuerst die Klemmreiter in die Profilschiene einzusetzen und danach die Stäbe der Funktionselemente senkrecht in die Öffnungen zu stecken. Es ist darauf zu achten, daß alle Stäbe vollständig bis zum Anschlag eingedrückt werden, um die Anordnung in einer Flucht zu gewährleisten.

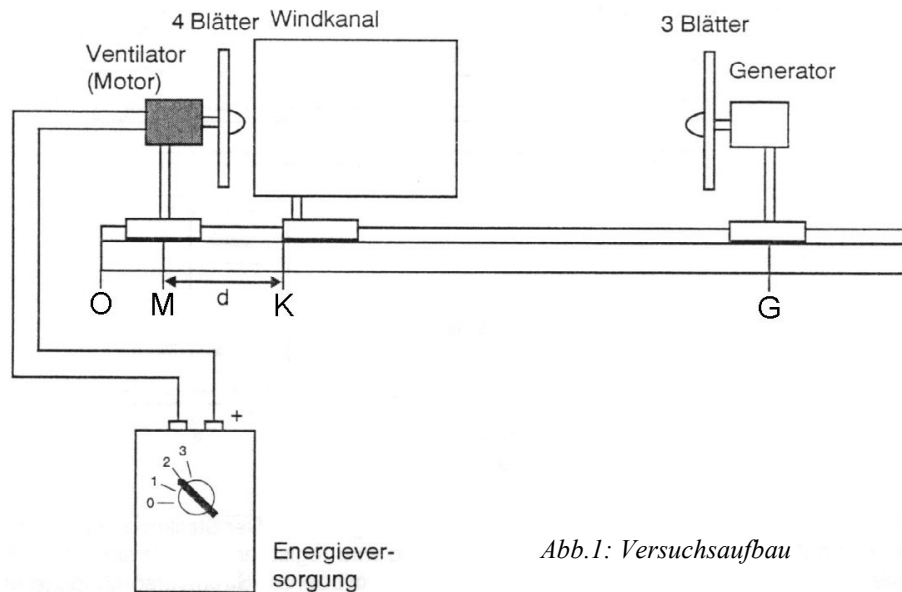


Abb.1: Versuchsaufbau

- Die Stäbe sind in die dargestellten Öffnungen der Klemmreiter einzusetzen.
- Ein 6 V-Elektromotor dient als **Antrieb** für den **Ventilator**. Er ist an einem Stift zu erkennen, der am Stab für die Arretierung im Klemmreiter sorgt.
- Ein 2 V-Elektromotor dient als **Generator**.
- Die **Rotoren** sind bis zum Anschlag auf die Steckachsen am Motor (Ventilator) bzw. Generator zu schieben.
- Die Betriebsdauer des 6 V-Motors sollte bei hohem Strom (über 2 A) fünf Minuten nicht überschreiten.
- **Einstellungen am Netzgerät:**
  - geringe Windstärke **W1** entsprechend ca. 3 V: die Windkraftanlage mit 2 Rotorblättern sollte langsam drehen
  - mittlere Windstärke **W2** entsprechend ca. 3,5 bis 4 V: die Windkraftanlage mit 1 Rotorblatt sollte drehen, spätestens nachdem sie angestoßen wurde.
  - hohe Windstärke **W3** entsprechend ca. 4 bis 4,5 V: die Spannung sollte ca. 0,5 V höher gewählt werden als für die mittlere Windstärke.

Hinweis zum Kapitel „TP Windenergie“:

Unterlagen zum Versuch: Experimentiersatz „Strom aus Windenergie“  
Cornelsen Experimenta  
Bestellnummer 54598

## 2 Einrichten des Winderzeugers

### Zweck des Versuches:

...

### Aufgabenstellung:

Die Abstände zwischen Ventilator, Windkanal und Windgenerator sind so einzustellen, daß sie für nachfolgende Versuche geeignet sind.

### Versuchsaufbau:

Ein **Multimeter** wird als Spannungsmesser an den Windgenerator angeschlossen (Abb.2).

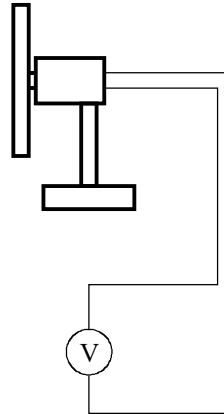


Abb.2: Spannungsmessung am Generator

Die **Rotoren** werden jeweils bis zum Anschlag auf die Steckachsen des Motors (**Ventilators**) bzw. **Generators** aufgesetzt. Der Ventilator erhält einen Rotor mit **vier** und der Generator einen mit **drei Blättern**.

**Die Rotorblätter des Ventilators müssen sich immer außerhalb des Windkanals befinden!**

### Versuchsdurchführung:

Nun stellt man den Drehknopf am Netzgerät auf 3 V und beobachtet den Ventilator. Wenn am Ausgang des Windkanals mit der Hand **kein Luftstrom** spürbar ist, muß der **Anschluß des Motors umgepolt** werden.

Der Stellknopf am Netzgerät wird die Spannung für mittlere Windstärke **W2** gestellt, so dass durch den Luftstrom der Windgenerator anläuft. Die erzeugte Spannung wird am Multimeter abgelesen.

Durch vorsichtiges Verschieben des Klemmreiters mit dem Ventilator wird der Abstand  $d$  verändert. Die Auswirkung auf die erzeugte Spannung wird am Multimeter abgelesen.

Der **optimale Abstand** ist erreicht, wenn bei W2 am Netzgerät am Generator eine **Spannung von ca. 1,5 V** gemessen wird. Die eingestellten Abstände und die gemessene Spannung sind in eine Tabelle (Abb.3) einzutragen.

Nummer Windkoffer:	
Spannung Netzgerät:	
Rotorblätter am Generator:	3
Abstand OM	
Abstand OK	
Abstand OG	
Spannung am Generator	

Abb.3: Tabelle für Meßwerte zum Einrichten des Versuchsaufbaus

### 3 Vergleich der Rotorblätter des Windgenerators

#### Aufgabenstellung:

Der Einfluss der Anzahl an Rotorblättern auf die am Windgenerator anliegende Spannung soll ermittelt werden.

#### Versuchsaufbau:

Wie beim „Einrichten des Windgenerators“ (Abschnitt 2).

#### Versuchsdurchführung:

Zuerst wird am Generator der Rotor mit drei Blättern aufgesteckt. Der Stellknopf am Netzgerät wird auf "W2" gestellt. Die angezeigte Spannung wird registriert. Der Versuchsablauf wird danach mit den Rotoren mit ein, zwei und vier Blättern wiederholt, wobei am Netzgerät stets auf "0" zurückgeschaltet werden muß. Die gemessenen Werte werden in eine Tabelle (Abb.4) eingetragen.

Beim Versuch mit dem Ein-Blatt und Zwei-Blatt-Rotor kann es erforderlich sein, diese mit der Hand anzustoßen.

Der Versuch wird bei Stufe "W3" am Stromversorgungsgerät wiederholt.

Anzahl an Rotorblättern	Spannung U bei Stufe „W2“ in V	Spannung U bei Stufe „W3“ in V

Abb.4: Tabelle für Meßwerte zum Vergleich der Anzahl an Rotorblättern

#### Versuchsauswertung:

Stelle die Ergebnisse der Messungen in einem **Diagramm (Spannung, Rotorzahl)** dar, d.h. die **Spannung soll als Funktion (Ordinate) der Rotorzahl (Abszisse)** aufgetragen werden.

#### Schlußfolgerung:

Interpretiere die Meßergebnisse (Diagramm), indem du den Einfluß der Rotorzahl auf die erzeugte Spannung beschreibst.

Berücksichtige dabei alle Einflußgrößen.

## 4 Einfluss der Windstärke

### 4.1 Einfluss auf die Generatorspannung

#### Aufgabenstellung:

| Der Einfluß der Windstärke auf die am Windgenerator anliegende Spannung soll ermittelt werden.

#### Versuchsaufbau:

Ähnlich wie beim „Einrichten des Windgenerators“ (Abschnitt 2).

Zusätzlich wird der Ausgang des Generators mit einem verstellbaren **Widerstand 500 Ohm** verbunden (Abb.5).

Der Drehknopf des Stellwiderstandes soll sich am linken Anschlag ( $R=500\text{ Ohm}$ ) befinden. **Überprüfe** zunächst den Widerstandswert.

Parallel dazu wird das Multimeter als **Spannungsmesser** geschaltet.

Der Generator wird mit dem Drei-Blatt-Rotor versehen.

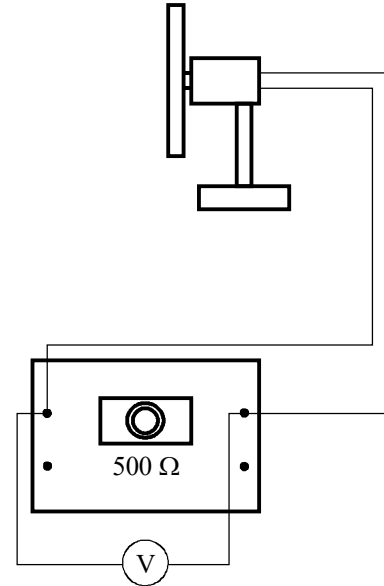


Abb.5: Spannungsmessung mit Stellwiderstand

#### Versuchsdurchführung:

Der Drehknopf am Stromversorgungsgerät wird auf Position "W3" gedreht und der Spannungswert am Multimeter abgelesen. Der Stellwiderstand wird in kleinen Schritten so lange verändert, bis sich bei Belastung eine Spannung von ca. 1,8 V einstellt.

Danach wird der Drehknopf am Stromversorgungsgerät auf "W2" bzw. "W1" zurückgestellt und jeweils der Spannungswert registriert.

Die ermittelten Werte werden in die Tabelle (Abb.6) eingetragen.

Spannung am Netzgerät	Spannung ...

Abb.6: Tabelle für Meßwerte zum Messen des Einflusses der Windstärke

#### Versuchsauswertung:

Stelle die Ergebnisse der Messungen in einem Diagramm dar.

#### Schlußfolgerung:

Interpretiere die Meßergebnisse (Diagramm).

## 4.2 Einfluss auf die Generatorleistung

### Aufgabenstellung:

Der Einfluß der Windstärke auf die vom Windgenerator erzeugte Leistung soll ermittelt werden. Was muß hierzu - wo- gemessen werden?

### Versuchsaufbau:

Wie beim „Einfluß auf die Generatorspannung“ (Abschnitt 4.1). Zusätzlich wird ein Multimeter als **Strommeßgerät** zwischen Generator und verstellbarem **Widerstand** (in Reihe) (Abb.7) geschaltet.

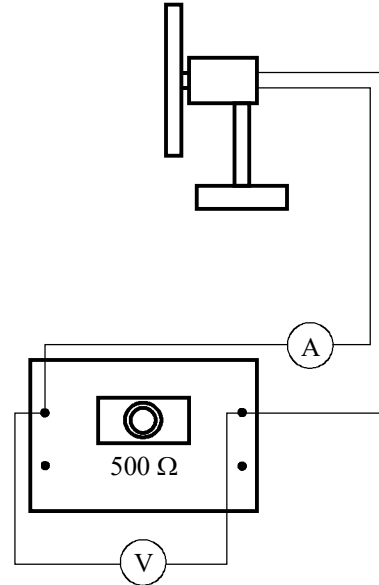


Abb.7: Strom- und Spannungsmessung mit Widerstand

### Versuchsdurchführung:

Versuchsdurchführung wie beim „Einfluß auf die Generatorspannung“ (Abschnitt 4.1). Die ermittelten Werte werden in die Tabelle (Abb.8) eingetragen.

Spannung am Netzgerät	Spannung	Strom	Leistung
...	...	...	...

Abb.8: Tabelle für Meßwerte zum Messen des Einflusses der Windstärke

### Versuchsauswertung:

Berechne die erzeugten Leistungen.

Stelle die Ergebnisse der Messungen in einem Diagramm (Erzeugte Leistung, Windstärke) dar. (Die erzeugte Leistung soll als Funktion (Ordinate) der Windstärke (Abszisse) aufgetragen werden.)

### Schlußfolgerung:

Interpretiere die Meßergebnisse ( mit Diagramm ), indem du den Einfluß der Windstärke auf die erzeugte Spannung beschreibst.

### 4.3 Messung der Windstärke

#### Aufgabenstellung:

Welche „Zahlenwerte“ könnte man der Windstärke zuordnen (mit den bisher verwendeten und anderen, vorhandenen Messgeräten messbare Größen)?

#### Versuchsaufbau und -vorbereitungen:

Zeichne deinen Versuchsaufbau.

Bereite eine Tabelle vor, um die Meßwerte einzutragen.

Halte vor Beginn der Messungen Rücksprache mit dem Lehrer.

#### Versuchsdurchführung:

Führe deine Messungen durch.

Vervollständige deine Tabelle bei den Messungen.

#### Versuchsauswertung:

Berechne die erforderliche Größe(n).

Stelle die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen zusammen mit denen aus Abschnitt 4.2 in **zwei** Diagrammen (Erzeugte Leistung, . . . ) bzw. (Erzeugte Leistung, . . . ) dar. Wähle die geeigneten Abszissen: aus den Diagrammen soll man den Zusammenhang zwischen den Größen erkennen.

Durch welche Größe (mit Zahlenwert(en)) kann man einen Zusammenhang zwischen der zugeführten „Luft“ und der erzeugten Leistung beschreiben? (Denke an dein Wissen aus dem theoretischen Teil des Kurses).

#### Schlußfolgerung:

Interpretiere die Meßergebnisse (Diagramme).

## 5 Belastung des Windgenerators

### 5.1 Einfluß eines Verbrauchers auf die Generatorspannung

#### Aufgabenstellung:

Wie verhält die Spannung am Generator sich, wenn ein Verbraucher angeschlossen ist?

#### Versuchsaufbau und -vorbereitungen:

Wie beim „Einfluß auf die Generatorspannung“ (Abschnitt 4.1).

An Stelle des Stellwiderstandes wird eine Glühlampe mit dem Stecksocket verbunden (Abb.8).

Bereite eine Tabelle vor, um Vorgänge beim Versuchsablauf, Versuchsbedingungen, Meßwerte und Beobachtungen einzutragen.

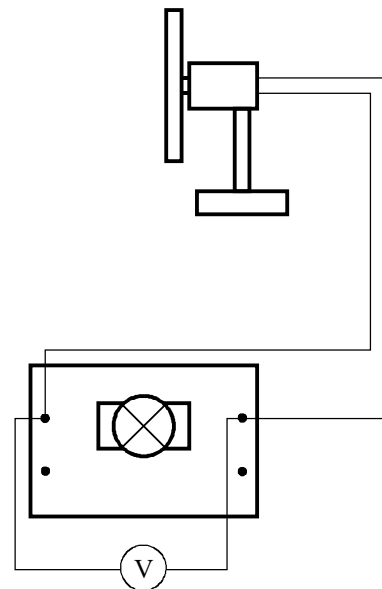


Abb.8: Spannungsmessung mit Glühlampe

**Versuchsdurchführung:**

Schraube die Glühlampe zunächst nicht fest. Stelle das Stromversorgungsgerät auf Position „W2“.

Schraube die Glühlampe dann fest.

Dreh die Glühlampe wieder heraus.

Schraube die Glühlampe nochmals fest.

Wiederhole den Versuch mit der vollen Windstärke.

**Versuchsauswertung:**

Interpretiere die Meßergebnisse. Erkläre die Vorgänge.

**Schlußfolgerung:**

...

**5.2 Leistungsanpassung****Aufgabenstellung:**

| Wie verhält sich die vom Generator abgegebene Leistung in Abhängigkeit der Belastung?

**Versuchsaufbau und -vorbereitungen:**

Wie beim „Einfluss auf die Generatorspannung“ (Abschnitt 4.2).

**Versuchsdurchführung:**

Der Drehknopf am Netzgerät wird auf Position "W2" gedreht. Der Drehknopf des Stellwiderstandes soll sich zunächst am linken Anschlag (ca.  $R=500\ \Omega$ ) befinden.

Der Stellwiderstand wird **langsam** und **sorgfältig** so verstellt, daß sich **ungefähr** die in Abb.9 angegebenen Widerstandswerte einstellen.

Der Widerstand muss also jeweils gemessen werden! Dazu muss er **ausgebaut** sein!

Trage die entsprechenden Werte für die Spannung und Stromstärke ein.

Sollwiderstand	in	500	250	100	80	50	40	30	20	10	5
Ohm											
Gemessener Widerstand	in										
Ohm											
Spannung	in V										
Stromstärke	in mA										

Abb.9: Messungen zur Leistungsanpassung

**Versuchsauswertung:**

Berechne für jeden Meßwert die elektrische Leistung.

Stelle die Ergebnisse der Messungen in einem Diagramm (Stromstärke, Spannung) und in einem Diagramm (Leistung, Belastungswiderstand) dar.

Interpretiere die dargestellten Meßergebnisse.

**Schlußfolgerung:**

...







## TP 7: Brennstoffzelle

### 1 Solarmodul

#### Zweck des Versuches:

...

#### Versuchsaufbau:

Material (Notiere die markierten Nummern):

- Solarmodul
- Lampe (100 W)
- Stativ mit Doppelmuffe
- Spannungsmessgerät, Messbereich 20V
- Strommessgerät, Messbereich 200 mA
- Widerstandsdekade
- Kabel

Das Solarmodul ist mit der Widerstandsdekade und den beiden Multimetern zu verbinden. Die Leuchte soll senkrecht zur Oberfläche des Solarmoduls orientiert sein.

Die Messungen sollen für nachfolgende Widerstände (Abb.1) durchgeführt:

R ( $\Omega$ )	1	3	5	8	10	15	20	30	50	80	100	250	500
----------------	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----

Abb.1: Sollwiderstände

**Zeichne zunächst deinen Versuchsaufbau und eine Tabelle für deine Messwerte. Zeige dies dem Lehrer.**

#### Versuchsdurchführung:

Nach dem Aufbau soll 1 Minute Wartezeit erfolgen, um Fehler durch Temperaturschwankungen zu vermeiden.

Für alle möglichen Widerstände der Widerstandsdekade werden Strom und Spannung gemessen und notiert. Zwischen den einzelnen Messungen sollten jeweils ca. 20 Sekunden verstreichen

#### Versuchsauswertung:

Die Strom-Spannungs-Kennlinie gibt Aufschluss über das Leistungsverhalten des Solarmoduls. Aus der Strom-Spannungs-Kennlinie sowie der Leistungskurve erhält man den Punkt maximaler Leistung, den sogenannten Maximum Power Point (MPP).

- Berechne die vom Solarmodul abgegebene Leistung.
- Trage die Strom-Spannungs-Kennlinie (Strom in Abhängigkeit von der Spannung) auf.
- Trage die **Leistungskurve** (Leistung in Abhängigkeit von der Spannung) auf.
- Bestimmen den MPP und trage den Punkt in beide Diagramme ein.
- Unter welchen Bedingungen soll das Solarmodul betrieben werden. Erkläre.
- Wie ist der Wirkungsgrad des Solarmoduls definiert? Versuche den Wert zu bestimmen.

#### Schlussfolgerung:

Was ergibt sich aus dem Erlernten in Bezug auf den Zweck der Versuche?



## 2 PEM-Elektrolyseur

### Zweck der Versuche

...

### Versuchsaufbau:

Material	PEM-Elektrolyseur	2 Multimeter
	regelbare Spannungsquelle	Kabel
	Stoppuhr	

Der PEM-Elektrolyseur wird an die Spannungsquelle angeschlossen.

Strom und Spannung werden jeweils mit einem Multimeter gemessen. Strommessbereich 10A.

Zeichne den Schaltplan.

### Teil 1

#### Versuchsdurchführung:

Bereite eine Tabelle zum Notieren von Spannungen und Stromstärken vor.

Zeige dem Lehrer vor Beginn der Messungen den Schaltplan, die Tabelle und den Versuchsaufbau.

Erhöhe die Spannung an der Spannungsquelle kontinuierlich in 0,2 V-Schritten von 0 V bis 2 V und notiere dabei die jeweiligen Spannungen und Stromstärken.

Warten Sie zwischen den Messungen jeweils 20 s bis 30 s, bis sich die Stromstärke stabilisiert hat.

**Achte** insbesondere auf die **einsetzende Gasproduktion** und markiere die dazugehörige Spannung.

#### Versuchsauswertung:

- Stelle die Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrolyseurs dar.
- Die Kurve kann annähernd durch zwei Geraden angepasst werden. Tragen diese Geraden in der Kennlinie ein.  
Bei welcher Spannung schneidet die Gerade (mit der großen Steigung) die horizontale Achse?
- Markiere die Spannung im Diagramm, an der die Gasproduktion beginnt.
- Zusatz: Bestimme die Gleichungen der beiden Geraden und -daraus- (mathematische Aufgabe!) den Schnittpunkt der zweiten Geraden mit der horizontalen Achse.

### Teil 2

#### Versuchsdurchführung:

Schalte das Netzteil ein und stelle an der Spannungsquelle eine Spannung von ca. 1,8 V ein. Das System soll vor Beginn der eigentlichen Messungen bereits einigen Minuten Gas produzieren.

Unterbricht die Stromzufuhr. Fülle die beiden Speicher vollständig mit Wasser. Der Wasserspiegel soll mit der Linie 0 cm<sup>3</sup> deckungsgleich sein.

Starte die Zeitmessung in dem Moment, in dem du den Elektrolyseur mit der Spannungsquelle verbindest. Bestimmen das Volumen an Wasserstoff und Sauerstoff in Abhängigkeit von der Zeit, bis die Speicher maximal mit Gas gefüllt sind.

Die anliegende Spannung und die fließende Stromstärke sind zu notieren.

#### Versuchsauswertung:

- Tragen die Volumina in Abhängigkeit von der Zeit auf. Bestimme und vergleiche die Produktionsrate beider Gase. Gib den produzierten Volumenstrom an.
- Der Brennwert  $H_0$  des Wasserstoffs beträgt  $12,745 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$ . Welche Energie wird frei, wenn 1 cm<sup>3</sup> Wasserstoff verbrannt wird?
- Welche Energie ist nach dem Versuch notwendig um 1 cm<sup>3</sup> Wasserstoff zu produzieren?
- Bestimme den energetischen Wirkungsgrad des Elektrolyseurs.

#### Schlussfolgerung:

(Berücksichtige den Zweck der Versuche)



### 3 Brennstoffzelle

#### Zweck des Versuches:

...

#### Versuchsaufbau:

Material	PEM-Elektrolyseur	Brennstoffzelle
	regelbare Spannungsquelle	Widerstandsdekade
	2 Multimeter	Kabel

Der PEM-Elektrolyseur wird zur Gasproduktion an die Spannungsquelle angeschlossen.

An die Brennstoffzelle wird als Verbraucher die Widerstandsdekade gehängt. In diesem Stromkreis sollen Strom und Spannung für verschiedene Widerstände (wie unter „1 Solarmodul“) gemessen werden.

Zeichne den Schaltplan.

#### Versuchsdurchführung:

Bereite eine Tabelle vor zum Notieren der Widerstände, Spannungen und Stromstärken.

Zeige dem Lehrer vor Beginn der Messungen den Schaltplan, die Tabelle und den Versuchsaufbau.

Schließe den Elektrolyseur an die Stromquelle an, um Wasserstoff und Sauerstoff zu produzieren. Verbinde die Ausgangsanschlüsse des Elektrolyseurs mit den Eingangsanschlüssen der Brennstoffzelle. Nachdem etwa  $5 \text{ cm}^3$  Wasserstoff produziert wurden, öffne die Ausgangsventile der Brennstoffzelle, durchspüle sie mit den Gasen und schließe die Ventile wieder. Dies dient dazu, Restgase zu entfernen.

Beginne die Messreihe mit der Leerlaufspannung ( $R = \infty$ ).

Falls du keine Messwerte bekommst, teste die Funktion der Brennstoffzelle indem du die Widerstandsdekade durch den Ventilator ersetzt.

#### Versuchsauswertung:

Die Leistungskurve gibt Aufschluss über das Leistungsverhalten der Brennstoffzelle.

- Trage die Strom-Spannungs-Kennlinie auf.
- Trage die Leistungskurve auf.
- Unter welchen Bedingungen soll die Brennstoffzelle betrieben werden. Erkläre.
- Wie groß ist der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle (bei letztem Punkt)?

#### Schlussfolgerung:

...





**TP 8: Schwingungen**

# 1 Schwingungsdauer eines Federpendels

**Zweck des Versuches:**

...

**Versuchsaufbau:**

Eine Schraubenfeder wird senkrecht an einen Haltebolzen gehängt (Abb.1), so dass mit Hilfe eines Gewichtstellers verschiedene Massen  $m$  an die Schraubenfeder gehängt werden können. Dieses System wird als Federpendel oder Federschwinger bezeichnet.

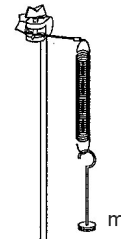


Abb.1: Aufbau Federpendel

**Versuchsdurchführung:**

- Bestimme die Federkonstanten der beiden Schraubenfedern.
- Bestimme die Massen der beiden Schraubenfedern.
- Hänge die kleinere (Durchmesser) Schraubenfeder an den Haltebolzen und belaste die Feder mit einer Masse  $m$ . Ermittle die benötigte Zeit  $t$  für 10 Schwingungen und trage den Meßwert in die Tabelle (Abb.2) ein.
- Wiederhole den Versuch mit allen anderen Massen entsprechend Abb.2 und halte die Meßergebnisse tabellarisch fest.
- Führe die gleichen Messungen mit der anderen Schraubenfeder durch und halte die Ergebnisse tabellarisch (Abb.3) fest.

Federkennkonstante:		=	N/m
Masse der Feder:		$m_0$	=
Anzahl der Schwingungen:		$n$	=
m in g	t in s		
20			
40			
60			
80			
100			
120			
140			

Abb.2: Messwerte Federpendel (kleinere Schraubenfeder)

Federkennkonstante:		=	N/m
Masse der Feder:		$m_0$	=
Anzahl der Schwingungen:		$n$	=
m in g	t in s		
40			
60			
80			
100			
120			
140			

Abb.3: Meßwerte Federpendel

**Versuchsauswertung:**

1. Berechne aus den Meßwerten die Schwingungsdauer  $T$  für eine Schwingung und trage die Werte in Abb.2 und 3 ein. Vergiß die physikalischen Größen und ihre Einheiten (Grund- oder Basiseinheiten) nicht.
2. Trage die Werte für die Schwingungsdauer  $T$  (beider Federpendel) als Funktion der Masse  $m$  in ein gemeinsames Diagramm (Abb.4) ein.

Interpretiere die Kurvenverläufe: Wie ist der Einfluß der Masse  $m$  bzw. der Federkonstanten  $D$  auf die Schwingungsdauer?



3. Berechne das Quadrat der Schwingungsdauer und trage die Werte für  $T^2$  ebenfalls in Abb.2 und 3 ein.
4. Trage die Werte für die das Quadrat der Schwingungsdauer  $T^2$  (beider Federpendel) als Funktion der Masse  $m$  in ein gemeinsames Diagramm (Abb.5) ein. (Auf Grundeinheiten achten).  
 Interpretiere die Kurvenverläufe: Wie ist der Einfluß der Masse  $m$  bzw. der Federkonstanten  $D$  auf die Schwingungsdauer?  
 Formuliere diese Erkenntnis in Form einer Gleichung (oder Proportionalität).
5. Berechne für beide Versuchsreihen das Verhältnis  $m/D$  und trage das Quadrat der Schwingungsdauer  $T^2$  über  $m/D$  für beide Federpendel in ein gemeinsames Diagramm (Abb.6) ein.
6. Ermittle die Steigung der Kurve aus Abb.6.
7. Interpretiere den Kurvenverlauf aus Abb.5 unter Berücksichtigung der Steigung. Formuliere das Ergebnis deiner Überlegungen in Form einer Gleichung.

**Fehlerbetrachtung:**

- Wodurch unterscheidet das Federpendel sich von einem idealen (theoretischen) Federpendel?
- Welche Fehler treten bei der Versuchsdurchführung auf?
- Weshalb verlaufen die Kurven in Abb.5 und 6 nicht durch den Koordinatenursprung?  
 Korrigieren den Fehler mit dem größten Einfluß und zeichne ein neues Diagramm für den Verlauf  $T^2$  über  $m/D$ .  
 Ermittle die Steigung der Kurve und vergleiche den Zahlenwert mit  $4 \pi^2$ .

**Schlußfolgerung:**

...

**Zusammenfassung:**

Schwingungsgleichung  
 eines Federpendels  
 (Federschwingers)

$T$ : Periodendauer in s  
 ...

## 2 Schwingungsdauer eines Fadenpendels

**Zweck des Versuches:**

...

**Versuchsaufbau:**

Eine Angelschnur wird an einen Haltebolzen gehängt (Abb.7), so dass z.T. mit Hilfe eines Gewichtstellers verschiedene Massen  $m$  an die Schnur gehängt werden können. Der Abstand  $l$  zwischen dem Drehpunkt der Schnur und der „Masse“  $m$  soll ca. 60 cm betragen.

Dieses System wird als Fadenpendel bezeichnet.

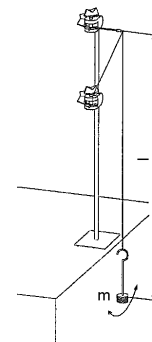


Abb.7: Aufbau Fadenpendel

**Versuchsdurchführung:**

- Bestimme den genauen Abstand zwischen dem Drehpunkt der Schnur und dem Schwerpunkt der Masse.
- Hänge eine Masse von  $m = 30\text{ g}$  an die Schnur. Ermittle die benötigte Zeit  $t$  für 10 Schwingungen und trage den Meßwert in die Tabelle (Abb.8) ein.
- Wiederhole den Versuch mit allen anderen Massen entsprechend Abb.8 und halte die Meßergebnisse tabellarisch fest.
- Hänge erneut eine Masse von  $m = 50\text{ g}$  an die Schnur. Verändere die Länge des Fadenpendels entsprechend den Werten in Abb.9, ermittle jeweils die benötigte Zeit  $t$  für 10 Schwingungen und halte die Meßergebnisse tabellarisch fest.

Länge des Fadenpendels: $l =$		
Anzahl der Schwingungen: $n =$		
$m$ in g	$t$ in s	
30		
50		
80		
100		

Abb.8: Meßwerte Fadenpendel 60 cm

Masse: $m =$			
Anzahl der Schwingungen: $n =$			
$l$ in cm	$t$ in s		
50			
40			
30			
20			
10			
5			

Abb.9: Meßwerte Fadenpendel 50 g

**Versuchsauswertung:**

1. Berechne aus den Messwerten die Schwingungsdauer  $T$  für eine Schwingung und trage die Werte in Abb.8 und 9 ein. Vergiß die physikalischen Größen und ihre Einheiten (Grundeinheiten) nicht. Interpretiere die Meßwerte: Wie ist der Einfluß der Masse  $m$  auf die Schwingungsdauer?
2. Trage die Werte für die Schwingungsdauer  $T$  (beider Meßreihen) als Funktion der Länge  $l$  in ein gemeinsames Diagramm (Abb.10) ein. Interpretiere den Kurvenverlauf: Wie ist der Einfluß der Länge des Fadenpendels auf die Schwingungsdauer?
3. Berechne die Quadratwurzel der Fadenlänge und trage die Werte für  $\sqrt{l}$  ebenfalls in Abb.8 und 9 ein.
4. Trage die Werte für die Schwingungsdauer  $T$  (beider Meßreihen) als Funktion der Quadratwurzel der Fadenlänge  $\sqrt{l}$  in ein gemeinsames Diagramm (Abb.11) ein. Interpretiere den Kurvenverlauf: Wie ist der Einfluß der Fadenlänge auf die Schwingungsdauer? Formuliere diese Erkenntnis in Form einer Gleichung (oder Proportionalität).
5. Ermittle die Steigung der Kurve aus Abb.11 und vergleiche ihn mit dem Zahlenwert  $\frac{2\pi}{\sqrt{g}}$ .
6. Interpretiere den Kurvenverlauf aus Abb.11 unter Berücksichtigung der Steigung. Formuliere das Ergebnis deiner Überlegungen in Form einer Gleichung.

**Fehlerbetrachtung:**

- Wodurch unterscheidet das Fadenpendel sich von einem idealen (theoretischen) Fadenpendel?
- Welche Fehler treten bei der Versuchsdurchführung auf?

**Schlußfolgerung:**

**Zusammenfassung:**

Schwingungsgleichung eines Fadenpendels

$T$ : Periodendauer in s  
...







## TP 9: Bauteile der Elektrizitätslehre

### 1 Kondensator

#### 1.1 Zweck der Versuche

...

#### 1.2 Versuche

##### TEIL 1

##### Versuchsaufbau:

Vervollständige die Schaltung (Abb.1) mit den Messgeräten, physikalischen Größen und Zahlenwerten der Bauteile (Spannungsquelle 12 V, Strommeßbereich 200 mA, Widerstand 4,7 k $\Omega$ , Kondensator 4700  $\mu$ F).

Markiere zum Laden bzw. Entladen jeweils den geschlossenen Kreislauf mit einer farbigen Linie.

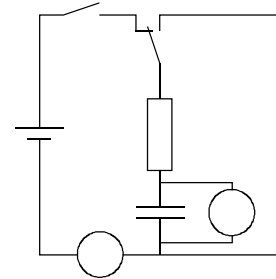


Abb.1: Kondensator-Schaltung

##### Versuchsvorbereitung:

Bereite Tabellen vor, um die Meßwerte für die Spannung zu verschiedenen Zeitpunkten einzutragen (für Lade- und Entladevorgang).

##### Versuchsdurchführung:

##### Laden des Kondensators

Stelle am Netzgerät 12 V ein und miss den genauen Wert. Schließe den Ladestromkreis und miß alle 5 Sekunden die Spannung am Kondensator. Beobachte den Strom.

##### Entladen des Kondensators

Schließe den Entladestromkreis durch Umschalten des Umschalters. Miß alle 5 Sekunden die Spannung. Beobachte den Strom.

##### Auswertung der Messungen:

Stelle den zeitlichen Verlauf der Spannung in einem Diagramm dar.

Beschreibe die Stromänderungen.

Bestimme die Zeit  $T_{1/2}$ , nach der die Hälfte der Maximalspannung erreicht wurde.

Erkläre die Funktionsweise des Kondensators.

##### TEIL 2

##### Versuchsvorbereitung:

Zeichne eine Kondensator-Schaltung mit einer Leuchtdiode als Verbraucher im Entladestromkreis. Vor dem Kondensator wird ein kleiner Widerstand (z.B. 100 $\Omega$ ) verwendet. Der Strom wird nicht gemessen.

Beobachte die Spannung beim Entladen.

Hinweis: Symbol für LED



Zeig dem Lehrer die Schaltung.

##### Versuchsdurchführung:

Lade den Kondensator über die Spannungsquelle (max. 5V) und entlade ihn über die Leuchtdiode.

##### Auswertung der Messungen:

Erkläre die Funktionsweise der Schaltung.

#### 1.3 Schlußfolgerung



## 2 Elektromotor

### 2.1 Zweck der Versuche

...

### 2.2 Versuche Elektromagnetismus

#### TEIL 1

##### Versuchsdurchführung:

Schalte ein Spannungsmeßgerät an eine Spule. Führe einen Stabmagneten in die Spule und beobachte dabei das Spannungsmeßgerät. Wiederhole den Versuch mit den umgekehrten Polen am Magneten. Wiederhole den Versuch mit einer anderen Spule.

##### Auswertung der Messungen:

Beschreibe die Beobachtungen.

Welche Größen beeinflussen die gemessenen Effekte?

#### TEIL 2

##### Versuchsdurchführung: (Lehrerversuch)

Beobachte den Versuch und notiere die Beobachtungen.

##### Auswertung:

Zeichne den Versuchsaufbau.

Beschreibe die Beobachtungen.

Erkläre die Effekte.

### 2.3 Zusammenbau Elektromotor

#### Material:

- Holzbrett
- 2 Büroklammer
- Kleber
- Draht
- Draht mit Lackschicht ( $\varnothing$  etwa 0.4 mm)
- Cutter
- Seitenschneider, Abisolierzange
- Batterie (9 V) oder Netzgerät
- Plastikröhre
- Starker Permanentmagnet

#### Aufbau und Durchführung:

- Zunächst wird der isolierte Draht auf der Plastikröhre aufgewickelt ( $\varnothing$  etwa 4 cm); 30 bis 40 Wicklungen (Abb.2).

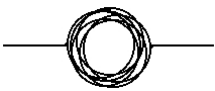
-  Zu beiden Seiten der Wicklungen soll jeweils ein Stück Draht von einigen cm Länge noch vorhanden sein; darauf achten daß diese beiden Stücke Draht möglichst gerade sind, da sich die Spule später um diese Drähte drehen soll (Abb.3).

Abb.3: Gewickelte Spule

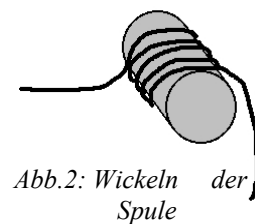


Abb.2: Wickeln der Spule

- Mit einigen kurzen Drahtstücken kann die gewickelte Spule zusätzlich verstärkt werden (Abb.4).

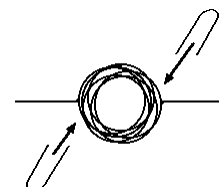


Abb.4: Verstärken der Spule

- Die obere Hälfte der Isolierung der beiden geraden Drahtstücke mit einem scharfen Messer oder Cutter abkratzen. Es ist **wichtig**, daß nur die obere Hälfte entfernt wird (Abb.5).

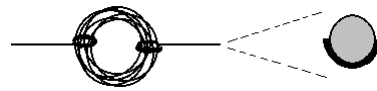


Abb.5: Entfernen der Isolation

- Zwei Büroklammern werden am Holzbrett befestigt (Kleber benutzen, falls notwendig), so daß sich die Spule in den beiden Büroklammern möglichst frei drehen kann (Abb.6).

Hierbei ist besonders darauf zu achten, daß sich die Spule leicht drehen lässt (Abb.7).

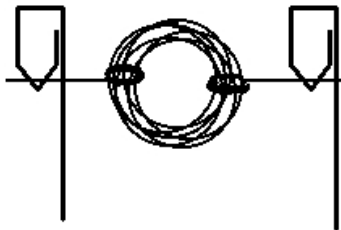


Abb.7: Zusammengebauter Elektromotor



Abb.6: Detailansicht

- Anschließend werden die beiden Büroklammern an ein Netzgerät (beziehungsweise eine Batterie) angeschlossen (Abb.8). Magnet dabei halten und die Spule anstoßen ...

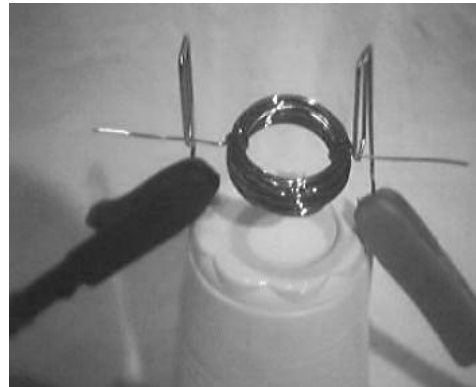


Abb.8: Angeschlossener Elektromotor

## 2.4 Schlußfolgerung

Erkläre die Funktionsweise des Elektromotors.



## **TP 10: Photovoltaik**

### **Zweck ...**

...

### **Aufgabe 1:**

Für eine im Jahr 2002 installierte 2,8 kWp-PV-Anlage sind nachfolgende Daten bekannt:

Anschaffungskosten: 25639,38 €.

2% Skonto bei Zahlung innerhalb von 8 Tagen.

Das Elektrizitätswerk zahlte damals 0,0731 € pro eingespeiste kWh. Es verrechnete monatlich 1,24 € Miete für den Zähler.

Subventionen vom Staat: 50% der Anschaffungskosten und 0,55 € pro eingespeiste kWh («prime d'encouragement écologique») während 20 Jahren.

Die Anlage wurde am 10 April 2002 installiert und in Betrieb genommen. Sie wurde sofort bezahlt und liefert seither jährlich durchschnittliche 2048 kWh.

Berechne:

- Wann sollte die Anlage amortisiert sein?
- Mit welchem Gewinn ist insgesamt zu rechnen?

### **Aufgabe 2:**

Informiere dich über die finanziellen Randbedingungen, die dann gelten, wenn dieses Jahr eine 2,8 kWp-PV-Anlage auf dem Dach eines Hauses installiert wird.

Informiere dich zusätzlich über den ungefähren Preis einer solchen Anlage.

Berücksichtige den üblichen Ertrag für Module, die hierzulande optimal ausgerichtet sind.

Berechne:

- Wann sollte die Anlage amortisiert sein?
- Mit welchem Gewinn ist insgesamt zu rechnen?

### **Schlussfolgerung:**

...





# TP 11: Elektrochemie

## 1 Elektrochemische Spannungsreihe

### Zweck des Versuches:

...

### Versuchsaufbau:

Tauche die nachfolgenden Metalle in jede der vorhandenen Metall-Lösungen. Verwende hierzu Bechergläser.

<u>Metalle:</u>	Kupferblech	<u>Lösungen:</u>	Kupfersulfat
	Zinkblech		Zinksulfat
	Eisennagel		Eisenchlorid
	Silberdraht		Silbernitrat

### Beobachtungen:

Trage die Ergebnisse der Versuche in nachfolgende Tabelle (Abb.1) ein.

Verwende die chemischen Symbole/Formeln zur Bezeichnung der Stoffe.

Metall: Lösung:				

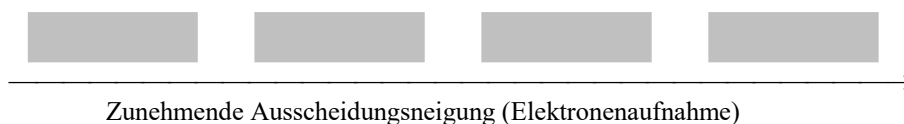
Abb.1: Reaktionen zwischen Metallen und Metallösungen

### Auswertung der Messungen:

1. Wodurch entstehen die Veränderungen an den (festen) Metallen?
2. Betrachte die Meßergebnisse. Was fällt dir auf?

### Aufgaben:

1. Aus welcher der vier Lösungen werden die Ionen am leichtesten reduziert (d.h. als Metall ausgeschieden)?
2. Ordne die Metalle nach zunehmender Ausscheidungsneigung:



### Anmerkung:

Die Anordnung der Metalle nach ihrer Reaktionsfreudigkeit stellt einen kleinen Auszug aus der **Löslichkeitsreihe** oder **elektrochemischen Spannungsreihe** dar.

### Schlußfolgerung:



## 2 Galvanisches Element

### Versuchsziel:

...

### Versuchsaufbau:

Ein **galvanisches Element** = **galvanische Zelle** besteht aus zwei Halbzellen.

Eine **Halbzelle** besteht aus einem **Redoxsystem** = **Redoxpaar** Metall/Metallionen  $Me/Me^{z+}$  d.h. aus einer **Metallelektrode** in einer Lösung, die Ionen des Elektrodenelementes enthält.

Als Lösung werden wässrige Salzlösungen der **Metallionen-Konzentration** 0,1 mol/l verwendet.

Zwischen den beiden Halbzellen muß ein **Stromschlüssel** verwendet werden, der einen Stromfluß durch Ionenwanderung ermöglicht. Hierzu wird ein angefeuchtetes „Küchenrollenpapier“ verwendet, dessen beide Enden jeweils in eine Halbzelle getaucht werden.

Die Spannung = **Potentialdifferenz** zwischen den beiden Halbzellen wird an den Elektroden gemessen.

Verwende nachfolgende Halbzellen:

Kupfer/Kupfersulfat  
Zink/Zinksulfat  
Eisen/Eisen-II-chlorid  
Blei/Bleinitrat  
Nickel/Nickelsulfat

### Aufgabe:

Zeichne den Versuchsaufbau.

### Beobachtungen:

Trage die Ergebnisse der Versuche in nachfolgende Tabelle (Abb.2) ein. Achte auf das Vorzeichen der Spannungen.

Verwende die chemischen Symbole/Formeln zur Bezeichnung der Stoffe.

(Elektroden der Halbzellen:)	Galvanisches Element	Potentialdifferenz = Spannung in Volt
(Zink und Kupfer)	$Zn/Zn^{2+} // Cu^{2+}/Cu$	
(Kupfer und Blei)		
(Kupfer und Eisen)		
(Blei und Zink)		
(Zink und Nickel)		

Abb.2: Potentialdifferenz verschiedener galvanischer Elemente

### Auswertung der Messungen:

1. Vergleiche die gemessenen Potentialdifferenzen. Was fällt dir auf?
2. Versuche die **Redoxpaare** entsprechend der gemessenen Potentialdifferenzen in eine Spannungsreihe (mit Zahlenwerten) einzuordnen. Als Nullpunkt wird das **Redoxpaar** gewählt, dessen Metall die geringste Ausscheidungsneigung hat d.h. am unedelsten ist.

### Schlußfolgerung:





# TP 12: Überlagerung harmonischer Schwingungen

**Wiederholung wichtiger Größen:**

$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$	$\omega$ : Winkelgeschwindigkeit in rad/s $\Delta\varphi$ : Drehwinkel in rad $\Delta t$ : Zeitintervall in s
---	---

T: Periodendauer in s = Dauer einer Umdrehung oder Schwingung  
 f: Frequenz in 1/s = Anzahl der Umdrehungen/Schwingungen in der Zeit t

Das Weg-Zeit-Diagramm einer **harmonischen Schwingung** ist eine Sinuskurve.

$y = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$	$y$ : Elongation (Auslenkung) in m $y_0$ : Amplitude in m $\omega$ : Winkelgeschwindigkeit in rad/s $t$ : Zeit in s $\varphi_0$ : Phasenwinkel bei $t = 0$ in rad
--	---

**Aufgabenstellung:**

In einem Excel-Sheet sollen jeweils **zwei harmonische Schwingungen und deren Überlagerung** in einem **Weg-Zeit-Diagramm** dargestellt werden.

- Die Zeitachse soll ca. zwei bis drei Perioden betragen.
- Als Legende (Abb.1) zu dem Diagramm sind die kennzeichnenden Größen der Schwingungen derart anzugeben, dass bei den weiteren Berechnungen auf diese Zahlenwerte zurückgegriffen werden kann.
- Die Aufgabe soll so gelöst werden, daß durch die Änderung einer der kennzeichnenden Größen in der Legende sofort die neuen Schwingungen dargestellt werden.
- Die Zahlenwerte der jeweiligen harmonischen Schwingungen  $y_1$  und  $y_2$ , die gemeinsam mit der Überlagerung  $y = y_1 + y_2$  in einem Diagramm dargestellt werden sollen, sind der Tabelle (Abb.2) zu entnehmen.
- Demzufolge sind für die Aufgabenteile a) bis f) **eine Legende und ein Diagramm** abzuspeichern, wobei die Aufgabenteile b) bis f) sich einfach durch Verändern der kennzeichnenden Größen der Schwingungen erzeugen lassen sollen.

$y = y_1 + y_2$	Mit $y_{01} = \dots$ m	und $y_{02} = \dots$ m
$= y_{01} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_{01}) + y_{02} \cdot \sin(\omega_2 \cdot t + \varphi_{02})$	$T_1 = \dots$ s	$T_2 = \dots$ s
	$\varphi_{01} = \dots$ °	$\varphi_{02} = \dots$ °

Abb.1: Legende zu den Aufgaben

Aufgabe	$y_{01}$	$T_1$	$\varphi_{01}$	$y_{02}$	$T_2$	$\varphi_{02}$
a)	50 m	60 s	0°	30 m	60 s	0°
b)	50 m	60 s	0°	30 m	60 s	20°
c)	50 m	60 s	0°	30 m	60 s	180°
d)	50 m	60 s	0°	30 m	35 s	0°
e)	50 m	60 s	0°	- 30 m	60 s	0°
f)	50 m	60 s	0°	- 30 m	60 s	20°

Abb.2: Kennzeichnende Größen der Schwingungen (Aufgabenstellung)



**Versuchsdurchführung:**

- Die Legende (Abb.1) ist zunächst mit den Zahlenwerten aus Aufgabenteile a) einzugeben.
- Die kennzeichnenden Größen aus Abb.1 bzw. Abb.2 sind so umzurechnen, daß sie in die Berechnungsformel einer harmonischen Schwingung eingesetzt werden können.
- Im Excel-Sheet sind mehrere Zeitwerte  $t$  (bis zu einer Gesamtzeit von ca. 2,5 Perioden) anzugeben, beispielsweise in Zeitintervallen von 1 s.
- Für die jeweiligen Zeiten sind die Elongationen  $y_1$  und  $y_2$  der beiden harmonischen Schwingungen sowie die Elongation  $y$  der überlagerten Schwingung zu berechnen.
- Die Weg-Zeit-Diagramme der drei Schwingungen sind in einem gemeinsamen Diagramm darzustellen.
- Die Datei ist abzuspeichern und unter einem weiteren Namen zu sichern. In dieser zweiten Datei sind die kennzeichnenden Größen durch die Zahlenwerte aus dem nächsten Aufgabenteile zu ersetzen.
- Hierdurch sollten drei neue Schwingungen dargestellt werden. Diese sind wiederum abzuspeichern.
- In gleicher Weise sind alle Aufgabenteile ( b) bis f) zu lösen.
- Anmerkung: An Stelle von insgesamt 6 Dateien können auch 6 „Sheets“ in einer Datei verwendet werden.

**Versuchsauswertung:**

- Betrachte den Kurvenverlauf der überlagerten Schwingungen  $y$  und vergleiche ihn mit den Verläufen der jeweiligen harmonischen Schwingungen  $y_1$  und  $y_2$ . **Schreibe das Ergebnis für jede Teilaufgabe als kurzen Kommentar nieder.** Betrachte hierbei den Verlauf der Kurven und die maximalen Auslenkungen in Abhängigkeit der kennzeichnenden Größen der Schwingungen.
- Wann erhält man bei der Überlagerung von harmonischen Schwingungen wiederum eine harmonische Schwingung?

# TP 13: Kohlenstoffdioxid-Emissionen

**Zweck des Versuches:**

...

**Aufgabe:**

Der Energieverbrauch während eines Jahres soll recherchiert werden. Suche nachfolgende Zahlenwerte zusammen, notiere sie (mit Einheiten!) in Abb.1 und vergiss nicht sie in den Bericht (mit Inform. über Zeitraum und betroffene Personen) zu schreiben!

Stromverbrauch Heizöl- oder Erdgasverbrauch Reisedstrecken mit: Auto (Verbrauch ?) Mofa/Motorrad (Verbrauch ?) Bus und Bahn Flugzeug	
Produktion (Photovoltaik ...)	

Abb.1: Energieverbrauch

Im Falle einer Photovoltaikanlage oder eines anderen Stromproduzenten sind die entsprechenden Energiemengen ebenfalls in Abb.1 einzutragen.

**Versuchsauswertung:**

- Mit Hilfe der Umrechnungstabellen in der Schule wird für die einzelnen Energieverbraucher die freigesetzte Menge an Kohlenstoffdioxid bestimmt.
- Zusätzlich wird bei Stromproduktionen (Photovoltaik, Blockheizkraftwerke) die eingesparte Menge an Kohlenstoffdioxid bestimmt.
- Durch Bilanzierung aller Werte werden die Emissionen pro Familienmitglied berechnet. Denke auch an Urlaube, ggf. in den Sommerferien.
- Betrachte deine Zahlenwerte und vergleiche sie mit anderen (z.B. Mitschüler). Vergleiche sie mit den Anteilen der Einwohner dieses Landes (und eventuell auch andere Länder).
- Schreibe diese Ergebnisse auch nieder! ☺

**Schlussfolgerung:**

Was ergibt sich aus dem Erlernten in Bezug auf den Zweck des Versuches?

**Zusammenfassung:**

*Abb.2 und 3: Zur Information..*

### Klimabündnis

Lëtzebuerg

Diesen Klima-Check schenkt Ihnen Ihre Gemeinde sowie das "Klimabündnis Lëtzebuerg", dem bisher 20 Luxemburger Gemeinden beigetreten sind. Diese werden bei ihrer Arbeit von den Nichtregierungsorganisationen "Mouvement Ecologique" und "Action Solidarité Tiers Monde" aktiv begleitet und vom Umwelt- sowie vom Kooperationsministerium finanziell unterstützt. Gemeinden und Organisationen verbindet der gemeinsame Wunsch, das Klima zu schützen und die Völker im Süden zu unterstützen. Falls Sie mehr darüber wissen möchten: [www.klimabuendnis.lu](http://www.klimabuendnis.lu) oder wenden Sie sich an Ihre Klimabündnisgemeinde:

Bastendorf, Beckerich, Bettembourg, Betzdorf, Esch/Alzette, Ettelbruck, Feulen, Heisch, Mamer, Mersch, Pétange, Roeser, S

## Bewertung

### Evaluation

Pro Jahr und pro Person <i>Par an et par personne</i>	
<b>Bis/jusqu'à 2.000 kg</b>	<b>Glückwunsch.</b> Sie erfüllen schon heute die Vorgaben für das Jahr 2010. <b>Félicitations,</b> vous remplissez déjà aujourd'hui les conditions pour l'année 2010.
<b>2.000 - 5.000 kg</b>	<b>Gut.</b> Sie sind auf dem richtigen Weg. Mit einigen Verbesserungen werden Sie die Vorgabe erreichen. <b>Bien.</b> Vous êtes sur la bonne voie. Vous allez atteindre l'objectif 2010 après quelques efforts supplémentaires.
<b>5.000 - 10.000 kg</b>	Einige Ihrer Aktivitäten sind mit beträchtlichen CO <sub>2</sub> -Emissionen verbunden. Durch die Klimabilanz erkennen Sie diese Schwachstellen. Informieren Sie sich über Einsparmöglichkeiten. <i>Vos activités génèrent des émissions considérables de CO<sub>2</sub>. Le bilan climatique vous permet de définir lesquelles. Demandez des conseils sur des possibilités de réaliser des économies d'énergie.</i>
<b>Über/plus de 10.000 kg</b>	<b>Klimaalarm!</b> Ihre CO <sub>2</sub> -Emissionen sind als zu hoch zu bewerten. Hohe CO <sub>2</sub> -Emissionen gefährden neben dem Klima bei uns auch die Lebensgrundlage vor allem in ärmeren Regionen unserer Erde. Handeln ist angesagt! <b>Alarme climatique!</b> Vos émissions peuvent être considérées comme très considérables et elles contribuent à un changement climatique. Prière d'agir!

